

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta stavební

Katedra stavebních hmot a diagnostiky staveb

**Mechanické a strukturní vlastnosti uměle
připravovaných pískovců**

**Mechanical and structural properties of artificial
sandstone**

Student:

Bc. Alena Pobežalová

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Pavel Mec

Ostrava 2017

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Alena Pobežalová**
Studijní program: N3607 Stavební inženýrství
Studijní obor: 3607T021 Stavební hmoty a diagnostika staveb
Téma: **Mechanické a strukturní vlastnosti uměle připravených pískovců**
Mechanical and structural properties of artificial sandstone
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

Pro účely práce budou připraveny vzorky umělých pískovců z běžně dostupných písků a také z písků vznikajících jako odpad při plavení kaolínu.

Pro přípravu pískovců budou použity různě kombinované frakce písků.

Umělé pískovce budou připravovány pomocí vodního skla a geopolymerních pojiv.

Připravené vzorky budou studovány z hlediska mechanických a fyzikálních vlastností.

Vzorky budou také studovány z pohledu mikrostruktury pomocí mikroskopie a počítačové tomografie.

Výsledky budou porovnány s vlastnostmi přírodních pískovců používaných v České republice pro stavební a dekorativní účely.

Seznam doporučené odborné literatury:

ČSN EN 14618, Umělý kámen – Terminologie a klasifikace, Český normalizační institut, 2010, Praha

KOTLÍK, P. Umělý kámen – materiál pro tmely, doplňky a kopie, Zpravodaj STOP – svazek 12, Společnost pro technologie ochrany památek, Praha, 2010, 4 - 10

STEFANIDOU, M., PACHTA, V., PAPAYIANNI, I.: Design and testing of artificial stone for the restoration of stone elements in monuments and historic buildings, Construction and building materials, 93, 2015, Elsevier

MARTINEC, P., M. VAVRO, J. SCUČKA a M. MASLAN. Properties and durability assessment of glauconitic sandstone: A case study on Zamel sandstone from the Bohemian Cretaceous Basin (Czech Republic). Engineering Geology [online]. 2010, 115(3-4), 175-181

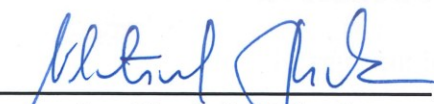
VAVRO, M., VAVRO, L., MARTINEC, P.: Barevně a texturně zajímavé křídové pískovce České republiky, Zpravodaj WTA, 1-2 (2009)

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Pavel Mec**

Datum zadání: 28.02.2017

Datum odevzdání: 30.11.2017



doc. Ing. Vlastimil Bílek, Ph.D.
vedoucí katedry





prof. Ing. Radim Čajka, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracovala samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedla jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě

.....

podpis studenta

Prohlašuji:

- Byla jsem seznámena s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- Beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB – TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- Souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB – TUO.
- Bylo sjednáno, že s VŠB – TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- Bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB – TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB – TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- Beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě

Poděkování

Tímto bych chtěla poděkovat vedoucímu mé diplomové práce Ing. Pavlovi Mecovi, za jeho cenné rady, trpělivost při vedení mé diplomové práce, za vstřícnost a pomoc při získávání potřebných informací a podkladů.

Poděkování patří také Institutu čistých technologií těžby a užití energetických surovin - Projekt udržitelnosti. Identifikační kód: LO1406 a také dr. Gembalové za pomoc při analýze elektronovým mikroskopem.

Dále bych chtěla poděkovat zaměstnancům katedry Stavebních hmot a diagnostiky staveb za pomoc při provádění zkoušek.

Anotace

Tato diplomová práce se zabývá způsoby přípravy umělých pískovců. Dokument obsahuje souhrn materiálů a metod vhodných pro jejich přípravu a dále ukazuje na mechanické vlastnosti, včetně trvanlivosti toho materiálu, jenž má sloužit jako alternativa přírodního pískovce.

Práce se dále věnuje studii pojivových systémů na bázi geopolymérů pro přípravu umělého pískovce. S tím je spojena také praktická část dokumentu, kde autor klade za cíl zvolit vhodný poměr pojiva a plniva ve směsi umělého pískovce s geopolymerním pojivem na bázi metakaolinu.

Klíčová slova: umělý kámen, pískovec, geopolymery, metakaolin

Abstract

This diploma thesis deals with methods of preparation of artificial sandstones. The document contains a summary of materials and methods suitable for their preparation and furthermore shows the mechanical properties, including the durability of the material to be used as an alternative to natural sandstone.

The paper deals with the study of geopolymer-based binder systems for the preparation of artificial sandstone. A practical part of the document is also associated therewith, where the author aims to choose a suitable ratio of binder and filler in a mixture of artificial sandstone with a metakaolin-based geopolymer binder.

Key words: artificial stone, sandstone, geopolymers, metakaolin

Obsah

Seznam použitého značení	10
1. Úvod.....	12
2. Umělý kámen	13
2.1 Základní suroviny	13
2.1.1 Plniva	13
2.1.2 Pojiva	15
2.1.3 Aditiva	18
2.2 Způsoby přípravy umělého kamene.....	20
2.2.1 Umělý kámen s epoxidovým pojivem.....	20
2.2.2 Umělý kámen na minerálním základě	22
2.2.3 Armování.....	22
2.3 Využití umělého kamene	22
2.3.1 Umělý kámen pro stavební účely	23
2.3.2 Výroba sanitárního zařízení.....	23
2.3.3 Kamenosochařská výroba a restaurátorství	24
3. Geopolymery	26
3.1 Historie geopolimerů	26
3.2 Struktura geopolimerů	27
3.3 Příprava geopolimerů.....	28
3.3.1 Alkalické aktivátory	29
3.3.2 Materiály vhodné pro alkalickou aktivaci	30
3.4 Vlastnosti a trvanlivost geopolymerních materiálů	31
3.5 Využití geopolimerů	32
4. Přírodní pískovec.....	34
4.1 Vybrané druhy pískovců používané v České republice.....	35

4.1.1	Hořícký pískovec	35
4.1.2	Mšenský pískovec	35
4.1.3	Božanovský pískovec	36
5.	Praktická část.....	37
5.1	Použité suroviny	37
5.2	Složení směsí	38
5.3	Příprava zkušebních vzorků.....	38
5.4	Použité zkušební metody	39
5.4.1	Zkouška pevnosti v tahu ohybem	40
5.4.2	Zkouška pevnosti v tlaku.....	41
5.4.3	Zkouška mrazuvzdornosti	41
5.4.4	Zkouška nasákavosti.....	43
5.4.5	Zkouška zdánlivé pórovitosti.....	43
5.4.6	Stanovení pH pískovců a použitých písků.....	44
5.5	Zpracování a vyhodnocení zkoušek.....	45
5.5.1	Výsledné pevnosti připravených pískovců	45
5.5.2	Výsledná nasákavost pískovců	47
5.5.3	Výsledná zdánlivá pórovitost	48
5.5.4	Výsledná mrazuvzdornost pískovců.....	50
5.5.5	Výsledné pH pískovců a použitých písků.....	52
5.5.6	Analýza pomocí rentgenové počítačové tomografie	53
5.5.7	Analýza elektronových mikroskopem	53
5.6	Vlastnosti vybraných přírodních pískovců	55
6.	Závěr.....	57
7.	Seznam použitých zdrojů	59
	Seznam obrázků.....	64
	Seznam tabulek.....	66

Seznam použitého značení

A	Plocha
ČSN	Česká technická norma
EN	Evropská norma
apod.	A podobně
obr.	Obrázek
viz.	Lze vidět (z latinského videlicet)
tzv.	Tak zvaný
y	Podíl frakce
d	Průměr
D	Průměr největšího zrna
n	Koeficient
R_c	Pevnost v tlaku [N/mm^2]
R_f	Pevnost v tahu za ohybu [N/mm^2]
F	Zatěžovací síla v okamžiku porušení tělesa [N]
b	Šířka trámečku [mm]
h	Výška trámečku [mm]
l	Vzdálenost mezi podporami [mm]
C	Nasákavost [%]
M_t	Hmotnost nasyceného a povrchově osušeného vzorku [g]
M_0	Hmotnost vysušeného vzorku [g]
PZ	Zdánlivá pórovitost [%]

m_s	Hmotnost vysušeného vzorku [g]
m_n	Hmotnost nasyceného a povrchově osušeného vzorku váženého na vzduch [g]
m_{nw}	Hmotnost nasyceného vzorku váženého ve vodě [g]
KM_{f25}	Součinitel mrazuvzdornosti pevnosti za ohybu po 25 zmrazovacích a rozmrazovacích cyklech [%]
R_f	Průměrná hodnota pevnosti za ohybu vysušených, nezmrazovaných zkušebních těles [MPa]
RM_f	Průměrná hodnota pevnosti za ohybu zkušebních těles po 25 zmrazovacích a rozmrazovacích cyklech [MPa]

1. Úvod

Důsledkem nárůstu lidské populace a zvyšující se spotřebou surovin, která tím souvisí, dochází k tenčení nerostných přírodních zdrojů. Tento trend se rozvíjí ve všech oblastech těžebního průmyslu stejně, protože se těžbařské společnosti snaží vyhovět stále více se zvyšující poptávce trhu. To je nepochybně spojeno s devastací krajiny a to nárůstem těžebních prostor a také vznikem nových deponií u těžeb, kde je produkt tříděn od hlušiny.

Takhle je tomu i v případě těžby přírodního pískovce. Kvůli tomuto lidstvo v poslední době vynakládá velké úsilí v hledání možností, jak objemy těžby co nejvíce snížit, případně nejlépe jak je nahradit jiným vhodným materiálem, jehož produkce bude mít menší dopad na životní prostředí. Jednou z těchto variant se naskytá příprava materiálu umělou cestou.

Přestože podle profesora Davidovitse byly alkalicky aktivované systémy známy již ve starém Egyptě a ostatních vyspělých civilizacích té doby, novodobý rozvoj v této oblasti byl obnoven až ve 20. století v souvislosti s využitím těchto materiálů v průmyslu. Kvůli jejich výjimečným vlastnostem a taky energetické a finanční nenáročnosti se jejich výroba a uplatnění rozšiřuje do nejrůznějších oblastí lidské činnosti. V historii byly tyto materiály použity pouze ve stavebnictví k výrobě stavebních dílců. V dnešní době je jejich využití rozmanitější. Využívají se například k restaurování historických památek. Mezi další zajímavá uplatnění patří sochařské odvětví, tvorba rozměrných kopií výtvarných děl apod. U alkalicky aktivovaných směsí je výhodou široká možnost modifikace jejich vzhledu a struktury pomocí různých plniv, barviv, pigmentů apod., čehož se dá ovšem hodně využít i v moderní architektuře.

Diplomová práce je rozdělena do dvou hlavních částí, do části teoretické a praktické. První část se zabývá teoretickými informacemi o umělém kameni, kde jsou popsány základní suroviny pro výrobu umělého kamenem, způsoby jeho přípravy a také jeho využití. V této části jsou dále popsány teoretické informace o kopolymer, jejich vlastností a přípravě. Také jsou zde popsány základní údaje o přírodním pískovci. Druhá, praktická část diplomové práce se zaměřuje na způsob výroby umělého pískovce a jeho vlastnosti. Konkrétně je u těchto vzorků stanovena pevnost v tahu za ohybu, pevnost v tlaku, mrazuvzdornost, nasákavost. Dále byly vzorky podrobeny analýze pomocí elektronového mikroskopu a pomocí průmyslového tomografu.

2. Umělý kámen

Od roku 2005 existuje pro průmyslovou přípravu výrobků z umělého kamene norma ČSN EN 14 618 Umělý kámen – terminologie a klasifikace. Zde jsou výrobky z umělého kamene definovány jako průmyslově vyráběné, a to zejména z hydraulického cementu, pryskyřice nebo jiných směsí, kamene a dalších přísad. Jedná se tedy o výrobky vyráběné průmyslově v geometrických tvarech pomocí lisování [1].

Daná norma, již ale dále nezahrnuje výrobky pro architektonické či sochařské použití, pro které je vedle prostých technických vlastností důležitá také estetická stránka. Jednotlivé postupy zkoušek pro stanovení technických vlastností umělého kamene zahrnuje norma ČSN EN 14 617 Umělý kámen – Zkušební metody [6].

2.1 Základní suroviny

Mezi základní složky umělého kamene patří plnivo tvořící vlastní hmotu materiálu (určuje vzhled, strukturu povrchu a často i barvu kamene). Další základní složkou tvořící umělý kámen je pojivo umožňující spojení jednotlivých zrn plniva, a tím se podílí na výsledné pevnosti kamene. Dalšími přídatnými složkami při přípravě směsi mohou být různá barviva nebo jiné látky, na základě kterých získá umělý kámen žádaný vzhled. Popřípadě se může jednat o látky upravující vlastnosti směsi, jako jsou například plastifikátory zlepšující zpracovatelnost [6,7].

2.1.1 Plniva

Druh plniva závisí především na požadovaném vzhledu výsledného produktu. Mezi tradičně používaná plniva se řadí drcené, případně mleté přírodní horniny. Jako dalším možným plnivem může být také čistý křemičitý písek a průmyslově vyráběný vápenec. Dříve se převážně jako plnivo používal drcený přírodní kámen, který si kameníci pro své potřeby upravovali sami. Kvůli mnoha problémům spojených s přípravou přírodních hornin, jako je drcení či mletí surovin, u kterých je nutné dosáhnout vysokého stupně jemnosti, se v poslední době používá především přírodní praný sklářský písek, popřípadě průmyslově mletý vápenec. Při výběru plniva hraje významnou roli to, jak má výsledný produkt vypadat a jaké má mít vlastnosti [6,7].

Nejnovějším trendem je také využívání alternativních plniv, která jsou vyráběná průmyslově. Jedná se většinou o případy, kdy se nedají použít klasická pojiva z důvodů

statických a estetických. Ve výrobě umělých kamenů se v poslední době stále více v restaurátorství používají duté kuličky mikroskopických rozměrů. Jde o sférické duté útvary ze skla, keramiky či polymerních látek. Pro tyto útvary se pomalu v českém jazyce vžívá název „mikrokuličky“, které jsou v zahraničí známy pod různými názvy a jsou většinou chráněny ochrannou známkou. Název těchto výrobků vystihuje jejich materiálové vlastnosti, jako je například: microballoons, microspheres, extendospheres nebo armospheres apod.). Mezi jejich hlavní důvody pro jejich použití patří nízká objemová hmotnost, která se pohybuje v rozmezí 0,1 až 0,7 g/cm³ při velikostech částic 5 až 350 μm. K první aplikaci alternativního plniva došlo na počátku 90. let na památkovém objektu v Čechách. Jednalo se o rekonstrukci Kohlovy kašny na 2. nádvoří Pražského hradu, kde se jednalo o plastickou retuš a také o aplikaci na kopii sousoší Madony se sv. Dominikem a T. Akvinským na Karlově mostě (obr. 1), kde šlo o faksimile ruky [8].



Obr. 1: Kohlova kašna a sousoší Madony se sv. Dominikem a T. Akvinským [30]

Dostatečnou péči vyžaduje i zastoupení jednotlivých frakcí, protože nevhodné granulometrické složení plniva nám zhoršuje nejen vzhled, ale i mechanické vlastnosti, také zvyšuje spotřebu pojiva, čímž se pak umělý kámen prodražuje. Při použití příliš jemného kameniva, spotřebujeme velké množství pojiva na obalení a spojení jednotlivých zrn, díky jejich většímu měrnému povrchu. Použijeme-li ale pouze větší zrna z jedné frakce, tak se opět spotřebuje větší množství pojiva na vyplnění prostoru mezi zrny. Ideálním způsobem je použití plniva se širší distribucí zrn, kde menší zrna vyplní prostor

větších zrn, čímž se sníží množství pojiva. Snížením množství pojiva je příznivě ovlivněna pórovitost, nasákavost a také cena výsledného produktu.

Optimálního vyplnění prostoru zrny je možno dosáhnout například distribucí zrn podle Fullerova vztahu:

$$y = \left(\frac{d}{D}\right)^n \times 100\% \quad (1)$$

kde y (% hm.) je podíl frakce o průměru d , D je průměr největšího zrna a n je exponentem, dle Fullera $n = 0,5$ [7,9].

2.1.2 Pojiva

Směsi pro přípravu umělého kamene můžeme v zásadě rozdělit do dvou skupin, a to na směsi s použitím anorganického pojiva, obvykle s hydraulickým pojivem, a na směsi s použitím organických pojiv, kam řadíme různé typy pryskyřic [6,7].

2.1.2.1 Anorganická pojiva

Do skupiny anorganických pojiv pro výrobu umělého kamene se řadí hydraulická pojiva, jako cement a hydraulické vápno. Pro použití v interiéru se často využívají směsi pojené sádrou.

Podmínkou pro použití anorganických pojiv je rozmíchání těchto materiálů s vodou, která je v systému nutná pro hydrataci pojiv a pro zpracovatelnost tvárné směsi. Použití vody u anorganických pojiv může být považováno za výhodu, kvůli snadnému dosažení požadované konzistence. Mezi výhody organických pojiv patří také relativně dobrá zpracovatelnost i při teplotách blízkých se k 0°C. Ve srovnání ale s organickými pojivy lze v některých případech snáze dosáhnout požadovaného vzhledu. Mezi další velkou výhodou patří levnější cena těchto pojiv.

Naopak mezi nevýhody těchto anorganických pojiv se řadí jejich horší přidržnost neboli adheze pojeného materiálu k podkladu. Tahle nevýhoda se projevuje hlavně v restaurátorské praxi, kde je nutné brát tento faktor v potaz. Další nevýhodou je nutnost zajištění dostatečného přísunu vody, během tuhnutí a následného tvrdnutí hmoty. Vyschnutí směsi by pak mělo za následek nedokonalou hydrataci pojiva, která by poté vedla k poklesu výsledných pevností a také k nežádoucím hydratačním objemovým změnám vedoucím k tvoření trhlin. Jako další nevýhodou je také poměrně dlouhá doba

potřebná k dosažení požadovaných pevností, která se udává v rozmezí až několika týdnů. Neméně důležitou vlastností je i menší odolnost anorganických pojiv vůči kyselému prostředí [6,7].

Protože se v mnoha případech jedná o světlé směsi, tak nejčastějším používaným anorganickým pojivem pro umělý kámen je bílý cement. Obsahuje nízký podíl barvicích oxidů jako je $\text{Fe}_2\text{O}_3 < 0,15\%$ a $\text{MnO} < 0,15\%$. Pro výrobu bílého portlandského cementu se vybírají pouze čistě bílé vápence, které mají minimální obsah sloučenin železa pohybující se v rozmezí od 0,2 do 0,5%, maximum obsahu těchto sloučenin je 1,0%. Hydrauličnost těchto cementů se vyvolává jemně rozptýleným oxidem křemičitým, nebo přídavkem kaolinu. Výsledný cement prakticky téměř postrádá kalciumferoalumináty ($< 1,4\%$). Barva bílého cementu se někdy také zlepšuje přídavkem vápencové moučky (10 až 40%), popřípadě jinými bělicími přísadami. Na bílé portlandské cementy jsou kladeny stejné požadavky jako na portlandské cementy příslušných tříd, které musí svými vlastnostmi odpovídat [9].

Velmi významným pojivem z hlediska historického je hydraulické vápno, které je v dnešní době částečně opomíjené. Jde o vápno obsahující hydraulické oxidy jako je SiO_2 , Al_2O_3 a Fe_2O_3 . Po smíchání s vodou se poté do jisté míry chovají jako portlandský cement.

Mezi anorganická pojiva se řadí i vodní sklo – vodné roztoky alkalických křemičitanů. K nevýhodám vodního skla se řadí nezanedbatelný obsah alkálií, který způsobuje výkvěty [9].

2.1.2.2 Organická pojiva

Nejvíce používaným organickým pojivem je v dnešní době pro výrobu umělého kamene epoxidová pryskyřice. První velké použití těchto epoxidových pryskyřic je spojeno s rozvojem syntetických polymerů v 60. letech 20. století. V tehdejší době začaly být organická pojiva používány pro své některé vlastnosti (zejména mechanické vlastnosti a vysokou pevností spojů) k lepení, přípravě tmelů a konsolidaci. Organická pojiva byla používána v architektonické praxi nebo v památkové péči pro zaplňování trhlin, a kromě toho také pro lepení nejrozličnějších materiálů včetně kovů a keramiky. Ve stavebním průmyslu se používala organická pojiva k zaplňování trhlin nebo k injektáži.

Zhruba od 2. poloviny 20. století byla u nás i v zahraničí (například ve Švýcarsku, v Polsku) zhotovována faksimile kamenosochařských děl, kde bylo jakožto pojiva právě použita epoxidová pryskyřice (obr. 3). Tyto výdusky zhotovené ze směsi pryskyřice a drceného kamene či písku vznikaly často jako náhrada kamenných soch umístěných v exteriéru namísto originálních děl, která byla uchována v lapidáriích nebo galeriích.

Důvodem využití těchto organických pojiv bylo pravděpodobně všeobecné nadšení z moderních syntetických materiálů, které v 60. a 70. letech panovalo, které se hojně využívaly v kamenosochařském průmyslu a v restaurátorství. Nicméně se v současné době od výroby umělého kamene s použitím epoxidových pryskyřic ustupuje a vrací se k výrobě umělého kamene s použitím anorganických pojiv [10].



Obr. 2: Kopie sochy M. B. Brauna *Onufrius* z *Nového lesa* u Kuksu [31]

Ve srovnání s anorganickými pojivy mají organická pojiva některé důležité výhody. Jednou z výhod epoxidových pryskyřic je jejich vysoká odolnost vůči kyselému prostředí a také krátká doba nutná k dosažení jejich konečné pevnosti. K neméně důležité vlastnosti zejména v restaurátorství patří velmi výborná přídržnou k podkladovému materiálu.

Naopak k nevýhodám organických pojiv patří jejich pomalejší vytvrzovací pochody při teplotách pohybujících se pod 15°C. Ke zpomalení nebo úplnému zastavení vytvrzování je dosaženo při styku s vlhkostí. V praxi to znamená použití uměle vysušeného plniva a při restaurování soch či architektonických objektů také dokonalé vysušení

podkladního lůžka. V případě, je-li povrch umělého kamene pojeného epoxidovou pryskyřicí vystaven UV záření, existuje možnost jejich zabarvení (zažloutnutí).

Jako organické pojivo se kromě epoxidové pryskyřice používají také polyesterové pryskyřice. Díky horší zpracovatelnosti a nepříjemnému zápachu nacházejí uplatnění hlavně v průmyslové výrobě, kde se zpracovává například odpadní dřev pro přípravu tzv. konglomerovaných směsí používaných pro výrobu dlažebních nebo obkladových desek [6,7,9].

Mezi další typy organických pojiv mohou řadit další typy polymerů, jako jsou například kapalné kaučuky nebo akrylátový kopolymer. V minulosti se jako pojivo používala směs tvarohu a hydroxidu vápenatého, tvořící dohromady tzv. keseinát vápenatý. Tato směs byla používána hlavně pro vytváření malých doplňků a zvláště k lepení. Dalším druhem pojiva, který byl používán především pro doplňování mramorů a i k lepení ulomených částí je šelak. Ojedinele se můžeme setkat také ještě s umělým kamenem vytvořeným z přírodní pryskyřice získaných z jehličnatých stromů [6,7].

2.1.3 Aditiva

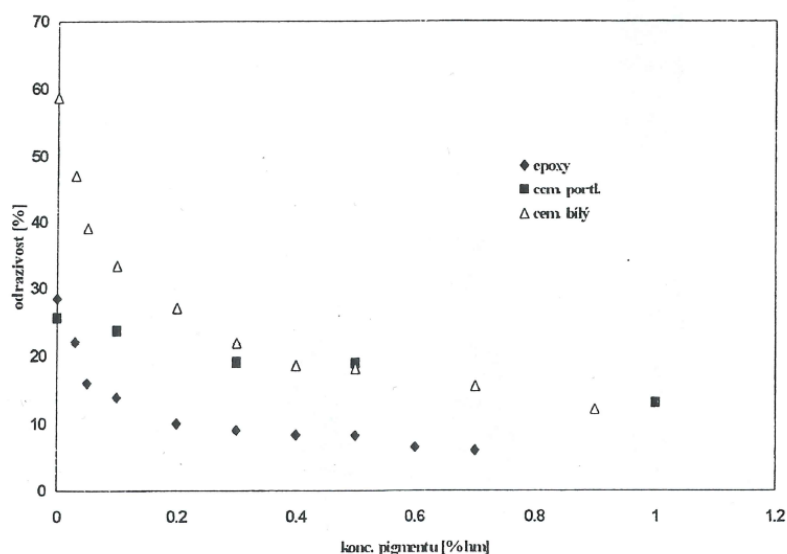
Aditiva jsou látky, které jsou záměrně přidávány během přípravy pro zlepšení nebo ovlivnění některých vlastností, jak tvárné směsi, tak i konečného výrobku. U výrobků z umělého kamene se nejčastěji přidávají přísady ovlivňující zpracovatelnost směsi nebo výsledný vzhled či mechanické vlastnosti výrobku [6].

Výroba ze směsí pojených epoxidovými pryskyřicemi často bývá doprovázena problémy s nedostatečnou plasticitou, tj. že směsi mají omezenou schopnost, podržet si svůj tvar v syrovém stavu. Zvýšení plasticity se dá dosáhnout přidáním plastifikátorů. Pro zvýšení plasticity se do směsi přidávají také jemné částice, jako je například oxid křemičitý, mastek a podobně. Množství plastifikačních přísad se pohybuje ve směsi kolem 3% hmotnosti směsi. Tyto látky také zároveň působí, jako matovala. Tento přídatek snižuje riziko vzniku nepřírodních lesklých ploch na povrchu větších oblých zrn. Směsi pojené cementem zpravidla nevyžadují přídatek plastifikátorů.

Pro úpravu barevnosti směsi se do směsi umělého kamene přidávají pigmenty. Díky alkalickému prostředí anorganických i organických pojiv, je důležité si vybírat barviva zachovávající si v takovém prostředí svoji stálou barevnost.

Z přírodních barviv se zejména osvědčili okry, získávané upravením barevných hlín bez přidání syntetických látek. Z umělých barviv se jedná pak o železité pigmenty na bázi oxidů železa, jež se do směsi přimíchávají pro dosažení žlutých, červených či hnědých odstínů. Pro dosažení zelené barvy se používá oxid chromitý [6,7].

Dávka pigmentů ve směsi se pohybuje okolo 0,5% z celkové hmotnosti směsi. Z laboratorních testů bylo totiž prokázáno, že vyšší přídavky pigmentu se na sytosti výsledného barevného odstínu nijak neprojeví (obr. 3) [6].



Obr. 3 Závislost odrazivosti umělého kamene na koncentraci pigmentu pro směsi s různými pojivy. Měření bylo prováděno při vlnové délce 520 nm [9].

Výrobkům na bázi hydraulického pojiva bývá často přičítána nestálost barevného pigmentu v alkalickém prostředí. Pravým důvodem však mohou být výkvětovité soli na povrchu výrobku, které svojí světlou barvou mohou ovlivnit barevnost výrobku. V kamenosochařství bývají situace, kdy se výrobky často dodatečně upravují (přesekávají). Použije-li se bílý křemičitý písek pro přípravu umělého kamene, výsledný odstín po přeseknutí zesvětlá.

Mezi aditiva zlepšující vzhled umělého kamene, tak aby se podobal co nejvíce přírodnímu kameni, patří například drcená slída, drcené skořápky (například skořápky mořských živočichů) a podobně [7].

Velice důležitým aditivem používaným hlavně v posledních letech jsou u směsí s hydraulickými pojivy polymerní disperze či redispergovatelné polymerní prášky, někdy

těž označované jako suché disperze. Přídavek těchto látek zvyšuje adhezi umělého kamene k původnímu materiálu. Tyto látky též rovněž zlepšují mechanické vlastnosti výrobku a podporují jejich správné tvrdnutí především v tenkých vrstvách. V přítomnosti vhodného rozpouštědla, jako je například toluenu, bobtná a tím klesá pevnost tmelu.

Mezi aditiva se řadí i tzv. spojovací látky zvyšující adhezi epoxidové pryskyřice k anorganickému plnivu. Příkladem těchto látek, může být γ -amino-propyl-triethoxysilan, vážící se jednou částí molekuly na povrch křemenných zrn a druhou částí vážící se do polymerní sítě epoxidové pryskyřice. Jestliže se smočí zrna písku v roztoku s touto látkou, dojde ke zvýšení konečné pevnosti v tlaku až o 50%. Optimální množství těchto aditiv se pohybuje okolo 3% [6,7].

2.2 Způsoby přípravy umělého kamene

Způsoby přípravy umělého kamene se vybírají na základě výsledného produktu a s ohledem na vlastnosti pojivových materiálů. Při výrobě výrobků pro použití ve stavebnictví, restaurátorství či v kamenosochařské výrobě jsou samozřejmě odlišné také výrobní postupy [7].

2.2.1 Umělý kámen s epoxidovým pojivem

Prvním krokem je při přípravě umělého kamene pojeného epoxidovou pryskyřicí příprava suché směsi (vlhkost snižuje pevnost umělého kamene), tedy správné určení frakce plniva v závislosti na požadovaném produktu. V případě potřeby se mohou do směsi přidat plastifikátory pro zvýšení plasticity směsi, například oxid křemičitý. Pro dosažení požadovaného barevného odstínu se přidávají do směsi sytké pigmenty. Je třeba ale počítat se změnou barevnosti v průběhu míchání směsi a také jednak v průběhu zrání směsi. Z tohoto důvodu se volí barevný odstín světlejší než původní zbarvení a počítá se s konečnou úpravou po vytvrzení.

Příprava tvárné směsi spočívá ve smíchání sytkých materiálů společně s odměřeným množstvím epoxidové pryskyřice a tvrdidla. Po homogenizaci je tato směs připravena k aplikaci. Zpracovatelnost takto připravené směsi se pohybuje zhruba okolo 0,5 až 2 hodin v závislosti na okolní teplotě. Poměrně dlouhé míchání směsi mění její konzistenci na těstovitou, ta se poté nepříjemně modeluje a dusá.

Tvárná směs se v několika vrstvách zpracovává dusáním do sádrových, kovových či kaučokových forem. Formy by měly být před naplněním upraveny vhodným separačním prostředkem. Umělý kámen je možné vzhledem k dostatečné pevnosti zpevňovat pomocí armatury. Takto je možné zhotovovat složité i rozměrné plastiky s tenkou stěnou. Tato skutečnost je vhodná u rekonstrukce památkových objektů. Pro armatury se dají použít armovací ocelové dráty či pletivo. Tyto materiály je důležité před uložením do formy opatřit nátěrem z epoxidové pryskyřice, pro lepší přilnutí k pojivovému systému. V případě potřeby je možné dodatečně umělý kámen zpevnit pomocí koncentrovanějšího roztoku epoxidové pryskyřice. Výrobek je možné i dodatečně obarvit pomocí pigmentů rozptýlenými v lihu [11].

Na mechanických vlastnostech umělého kamene pojeného epoxidovou pryskyřicí má významný vliv poměr pojiva a plniva. Obvyklý poměr epoxidové pryskyřice : písku se pohybuje okolo 1:10. V případě dobrého zhutnění a vhodné distribuce zrn je možné zvýšit množství polymerního pojiva a to na 1:15 až 1:12. Tam kde nejde směs dostatečně ztuhnout, z důvodu složitosti formy, je nezbytné množství pryskyřice zvýšit na 12%, někdy taky až 15% hmotnosti suché směsi [7].

První využití umělého kamene pro doplňování pískovcových kamenických prvků bylo zhruba před 50 lety na zámku v Roztokách a také na hradě Jenštejně. První faksimilí byl tympanon nad vchodem v ohradní zdi kostela Panny Marie Sněžné v Praze (obr. 4). Mezi nejznámější příklady faksimile z umělého pískovce se řadí soubor Braunových soch Ctností a neřestí v Kuksu. Mezi další aplikace s epoxidovou pryskyřicí se řadí vázy ve Vrtbovské zahradě (obr. 5) nebo i soubor vaz na atice Rudolfiny v Praze.



Obr. 4: Tympanon kostela P. M. Sněžné v Praze[31]



Obr. 5: Váza na Vrtbovské zahradě v Praze [31]

2.2.2 Umělý kámen na minerálním základě

Příprava umělého kamene na minerálním základě je podobná jako příprava umělého kamene s použitím epoxidové pryskyřice, kde je rozdíl v míchání suché směsi. U přípravy umělého kamene na bázi minerální směsi se suchá směs míchá společně s pojivovým materiálem a následně s vodou a případnými aditivy. Nejčastěji se tato směs nalévá do forem a následně hutní. Zpracovatelnost takovýchto směsí závisí především na zvoleném pojivu. Tato doba se dá prodloužit nebo zkrátit pomocí aditiv (retardéry nebo urychlovače tuhnutí a tvrdnutí) [12].

Optimální poměr cementového pojiva s pískem se pohybuje okolo 1:4. U anorganických pojiv je důležité brát v potaz i množství záměsové vody, jenž se výrazně podílí na výsledných vlastnostech. Ideální množství záměsové vody se pohybuje do 10% hmotnosti [6,7].

2.2.3 Armování

Armování se zejména používá v kamenosochařském průmyslu nebo i při restaurování sochařských děl, dále také při doplňování větších objemů nebo tenkých profilů. Je důležité, aby armovací materiál odolával alkalickému prostředí a měl tepelnou roztažnost blízkou teplotní roztažnosti tmelu. Také by měl mít samozřejmě dostatečnou pevnost.

V praxi se obecně nejvíce používá ocel, měď, mosaz, nerezová ocel, ale také se používají hliníkové dráty a podobně. Mezi nevýhody oceli patří její sklon ke korozi, hlavně potom v kyselém prostředí. Ke korozi dochází ovšem také u mosazi či mědi. Korozní produkty mědi mohou být však navíc vyplavovány na povrch umělého kamene a tím tak způsobovat nežádoucí skvrny [7].

2.3 Využití umělého kamene

Využití umělého kamene je velice široké. Dá se říct, že umělý kámen je možné využít všude, kde se běžně používá přírodní kámen. Umělý kámen si našel uplatnění jak ve stavebnictví, kde se používá v exteriéru i interiéru, tak i v kamenosochařském průmyslu a v restaurování. Jeho výhodou je nejen nižší cena, ale i výhodnější zpracovatelské

podmínky a v neposlední řadě poslední dobou také dosti ceněná vlastnost a to „design na míru“.

2.3.1 Umělý kámen pro stavební účely

Umělý kámen se dá využít ve stavebnictví všude tam, kde se běžně používá kámen přírodní. Z umělého kamene je možné vytvářet obklady určené pro vnitřní i venkovní použití (obr. 6). Dále se vyrábějí i tvarovky pro samotnou výstavbu. U těchto výrobků však převažuje použití anorganického pojiva, jako je hlavně cement, z tohoto důvodu je velká část těchto výrobků klasifikována jako výrobek z betonu. Směs umělého kamene obsahující plniva, pojiva, aditiva je nalita do měkké formy, jež dokonale imituje povrch přírodního kamene. V dnešní době je téměř nemožné rozeznat přírodní kámen od umělého a každá výrobní společnost má své vlastní výrobní technologie a formy [6,20].



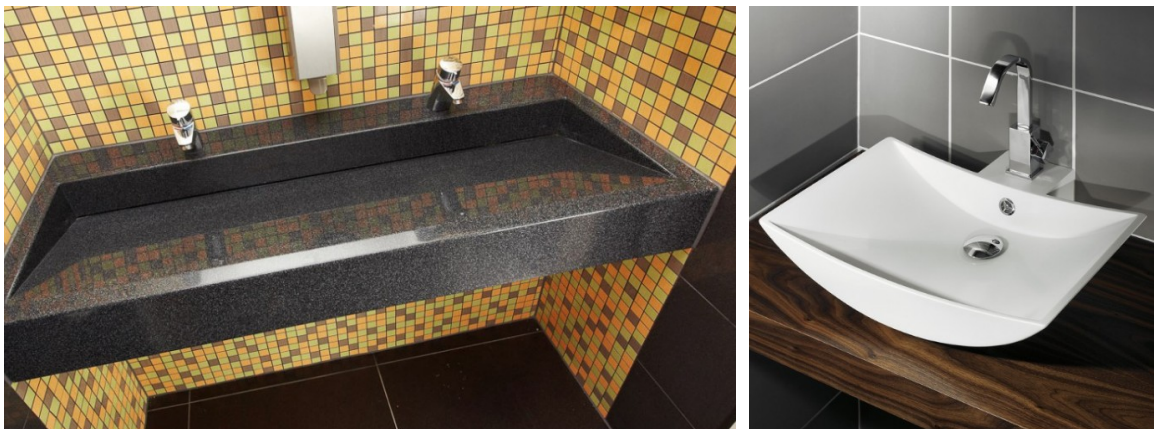
Obr. 6: Venkovní obklad z umělého kamene – břidlice [33]

2.3.2 Výroba sanitárního zařízení

Pro výrobu moderních sanitárních zařízení je vhodným materiálem umělý mramor neboli litý mramor. Díky jeho vysokým tepelně-izolačním vlastnostem, jsou z něj vyráběny dokonalé vany, sprchové kouty i koupelnový nábytek (obr. 7) a také doplňky do koupelny. Jedná o směs z minerálních plniv (mikromleté vápence, sklářské písky), polyesterové pryskyřice jakožto pojiva a pigmentů. Takto připravená směs je pak odlévána do kovových případně laminátových forem. Povrch výrobku je tvořen vysoce lesklou ochrannou vrstvou z polyesterové pryskyřice, jenž zabraňuje jejich poškození.

Umělý mramor je oproti přírodnímu mramoru mnohem odolnější proti mechanickému a chemickému poškození. Také velmi dobře odolává většině kyselin a látek

zásadité povahy i při větších koncentracích. Materiál ovšem vyniká i svými tepelně-izolačními vlastnostmi, díky kterým, například při výrobě van nebo sprchových koutů, voda v těchto výrobcích chladne mnohem pomaleji [34].



Obr. 7: Umyvadlo z litého mramoru [36]

2.3.3 Kamenosochařská výroba a restaurátorství

Umělý kámen se k restaurátorským účelům začal využívat přibližně od poloviny 19. století. Jedním z prvních restaurátorských děl je Brokofovo sousoší sv. Kajetána na Karlově mostě v Praze (obr. 8), jejíž restaurátorská práce proběhla v roce 1855. Umělý kámen splňuje při restaurování sochařských děl jak funkci estetickou, tak i výtvarnou, ale v některých případech plní taky funkci ochranou. Výtvarná funkce umělého kamene při restaurování sochařského díla spočívá v tom, že se pomocí tmelů dosáhne srozumitelnosti starého výtvarného sdělení pro současného diváka. Ochranná funkce umělého kamene při použití v restaurátorství spočívá v zatmelení určitých míst sochařské památky, jež by bez uzavření byly dále napadány povětrnostními vlivy a docházelo by tak k postupné degradaci.

U využití umělého kamene pro doplnění sochařského díla je nezbytné dodržovat v první řadě „zásadu minimálního zásahu do původního díla“. Jedním z dalších požadavků je, že tmel z umělého kamene by se měl omezit pouze na doplnění poškozeného místa a taky že by neměl překrývat okolní kámen. Barevnost a charakter povrchu u tmeleného místa by měl odpovídat jak barevností, tak i strukturou povrchu okolnímu původnímu kamennému materiálu.



Obr. 8: *Sousoší sv. Kajetána na Karlově mostě v Praze [30]*

Pro správné určení vlastností vytvářeného umělého kamene, jež bude používán k doplnění poškozených míst kamenosochařské památky, je nutné znát vlastnosti původního kamene. Důležitá je zejména pevnost, nasákavost, teplotní roztažnost, propustnost a materiálové složení původního kamene. Složení umělého kamene by mělo obsahovat zhruba 20-60% pevnosti původního kamene, 50-150% teplotní roztažnosti původního kamene a 50-100% nasákavosti a paropropustnosti původního kamene. Jednou z důležitých vlastností u umělého kamene je jeho přilnavost k původnímu kameni, jež by měla tvořit zhruba asi 50-80% přilnavosti (soudržnosti) původního materiálu. Je důležité, aby tyto fyzikální vlastnosti umělého kamene byly dodržovány, protože v případě, že má umělý kámen jiné parametry, dochází často k ohrožení a poškození původní kamenné hmoty kamenosochařského díla [13].

3. Geopolymery

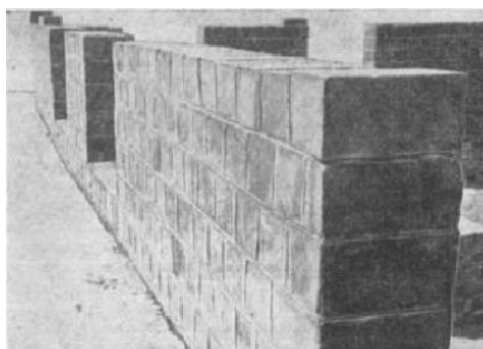
Geopolymery se řadí mezi alkalicky aktivované látky. Jedná se o anorganické polymerní materiály, pohybující se na rozhraní mezi hydraulickými pojivy, skelnými a keremickými materiály. Pojem geopolymery byl poprvé použit v roce 1979, kdy profesor Davidovits popsal tento materiál jako látku vznikající anorganickou polykondenzací tzv. geopolymerací (vlivem alkalické aktivace aluminosilikátových látek) [14,36].

Geopolymery se dají obecně označit jako druh aluminosilikátových látek amorfni až semikrystalické trojrozměrné struktury. Jedná se o strukturu skládající se z Si-O-Al kostry a je podobná přírodním zeolitům, avšak s nepravidelným uspořádáním [15].

3.1 Historie geopolimerů

Alkalických sloučenin, jakožto komponentů bylo poprvé do cementových materiálů použito v roce 1930, kdy Kühn poprvé zkoumal chování směsi jemně mleté strusky s hydroxidem draselným. V roce 1937 na jeho výzkum navázal Chassevent, který měřil reaktivitu strusky za použití hydroxidu draselného a roztoku sody. Na výzkum Kühna navázal také Purdon a to v roce 1940. Purdon se zabýval studiem cementů bez obsahu slínekových minerálů, sestávajících se ze strusky a hydroxidu sodného a alkalických roztoků připravených na základě reakce alkalické soli se silnou zásadou [16].

Výzkum geopolimerů se dostává v 50. letech také na území bývalého SSSR, kde Gluchovsky poprvé objevil možnosti přípravy pojiv na bázi aluminosilikátů s nízkým podílem vápníku (popřípadě bez vápníku – jíly) aktivovaných alkalickým aktivátorem. Gluchovsky označil materiál pojmem gruntocementy (gruntosilikáty) a svoji práci shrnul ve stejnojmenné publikaci. Jeho výzkum pak vedl až k praktickému využití těchto materiálů (obr. 9) [14,16].



Obr. 9 Stavba z gruntosilikátových bloků [14]

Podstatný podíl má na výzkumu geopolymérů také francouzský chemik Davidovits, který se této práci začal věnovat v 70. letech. Zajímal se především o výzkum pojiv získaných alkalickou aktivací, hlavně metakaolinu. Vzhledem k jejich polymerní struktuře nazval Davidovits tento vzniklý pojivový systém „geopolymery“. Kromě jiného je také autorem teorie výstavby egyptských pyramid z umělého kamene. Podle jeho názoru byly jednotlivé bloky pyramid vytvářeny z vápencového písku pojeného směsí hydroxidu vápenatého, uhličitanu sodného a vody, přičemž byla tato směs dusána do forem [14,16].

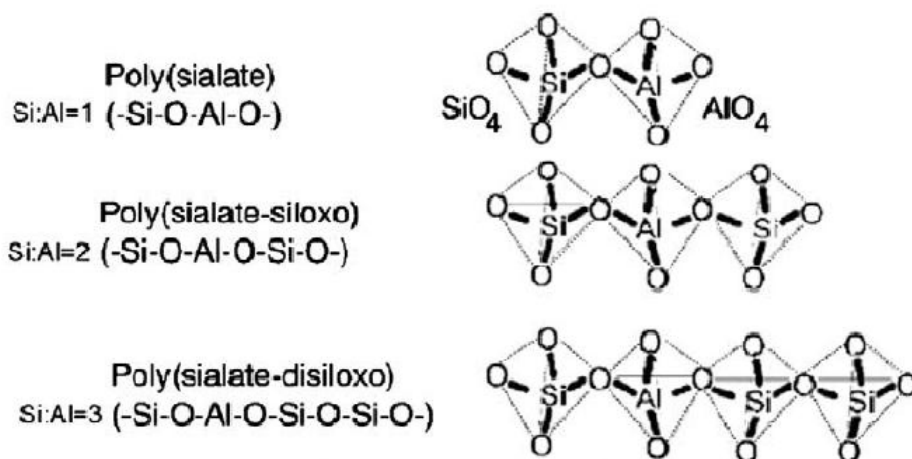
V poslední době probíhá po celém světě intenzivní výzkum těchto materiálů. Jedním z největších výzkumných projektů v České republice byl Projekt České rozvojové agentury, o. p. s. na zřízení Inovačního centra využívání technologie geopolymérů při Ústavu struktury a mechaniky hornin AV ČR, který proběhl v letech 2006 – 2007. Výzkumná činnost centra je zaměřena na využívání druhotných a odpadních surovin a také možností uplatnění geopolymérů v restaurátorské praxi.

3.2 Struktura geopolymérů

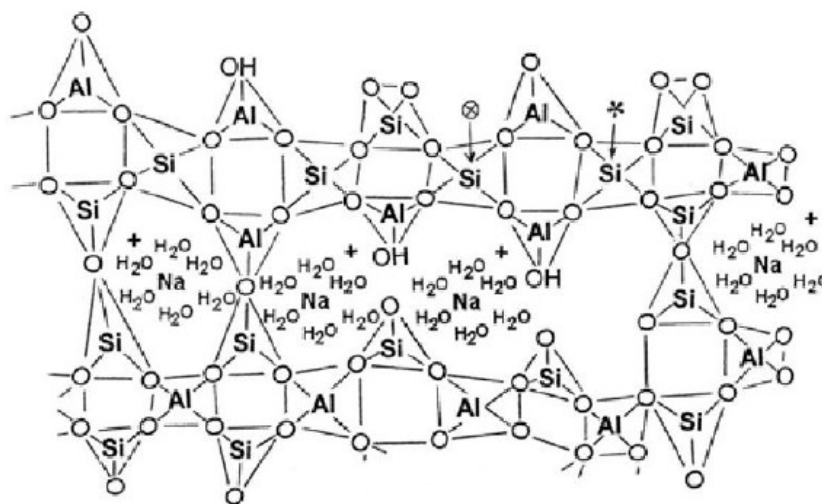
Profesor Davidovits zvolil pro geopolymery chemický název polysialáty, kde sialát označuje aluminosilikátovou skupinu (silicon-oxo-aluminate). Řetězce geopolymérů se skládají z tetraedrů SiO_4 a AlO_4 , které jsou spojeny kyslíkovými můstky. Kationty (Na^+ , K^+ , Ca^{2+}), které jsou přítomné ve struktuře geopolyméru vyrovnávají negativní náboj na Al a terminálních atomech kyslíku. Empirický vzorec geopolymérů lze zapsat jako $(M_n\{-(\text{Si-O})_z\text{-Al-O}\}_n \cdot w\text{H}_2\text{O})$, kde n znamená stupeň polykondenzace a z , počet tetraedrických jednotek ($z = 1, 2, 3$ nebo více než 3), M je označení alkalického kationtu.

Geopolymery jsou tvořeny molekulovými jednotkami (obr. 10):

- -Si-O-Al-O- poly(sialát)
- -Si-O-Al-O-Si-O- poly(sialát-siloxo)
- -Si-O-Al-O-Si-O-Si-O- poly(sialát-disiloxo)



Obr. 10 Produkty vznikající při polykondenzaci [18]



Obr. 11 Struktura geopolymery [19]

3.3 Příprava geopolymérů

Při přípravě geopolymérů jde o alkalickou aktivaci aluminosilikátového materiálu (v případě ryzích polymerů se použije metakaolin) silným alkalickým činidlem (NaOH, KOH, vodní sklo), za normální teploty.

Samotný proces geopolymeryzace spočívá v rozpuštění vazeb v aluminosilikátových materiálech vlivem zvyšujícího se pH alkalického roztoku. Rozrušením původních vazeb dojde ke vzniku aluminosilikátového gelu o složení $M_x(\text{AlO}_2)_y (\text{SiO}_2)_z \cdot n\text{MOH} \cdot m\text{H}_2\text{O}$,

který po určité časové prodlevě začne tuhnout na výsledný produkt reakce, tedy kopolymer [14,17].

Konečný produkt alkalické aktivace je závislý na podmínkách alkalické aktivace a surovinách vstupujících do reakčního procesu. Mimo fáze typu $(M_n\{-(Si-O)_x-Al-O\}_n \cdot wH_2O)$ může také vzniknout fáze C-S-H nebo C-A-H, popřípadě i voda v důsledku polykondenzace [20].

Koncentrace pevné látky ve směsi hraje velmi důležitou roli v procesu alkalické aktivace a během ní určuje výsledný produkt této reakce. Je-li ovšem vodní součinitel větší jak 1, jedná se o zředěnou suspenzi a produktem takovéhle reakce jsou potom krystalické zeolity (analcim, sodalit, heulandit). V případě, že je vodní součinitel menší jak 1, potom jde o hustou suspenzi kašovitě konzistence a výsledným produktem vzniklým za těchto podmínek je amorfní fáze [14].

3.3.1 Alkalické aktivátory

Mezi nejvíce používané alkalické aktivátory patří roztoky sodné a draselné, dále sodné či draselné vodní sklo a méně často se používají roztoky alkalických uhličitů [20].

Alkalický aktivátor je velmi klíčovou složkou geopolymerní reakce, který velmi ovlivňuje pevnost a vlastnosti vzniklého produktu. Množství aktivátoru závisí od ostatních složek; např. jedná-li se o sodný aktivátor, přidává se takové množství aktivátoru, aby se obsah Na_2O pohyboval v rozmezí od 2 do 8%. Podle doposavadních provedených výzkumů se zjistilo, že vyšší pevnosti se dosáhne ve směsích obsahující jako aktivátor vodní sklo, a to samostatně, popřípadě ve směsi s roztokem hydroxidu. Zvýšení pevnosti, lze také dosáhnout, pokud je vodní sklo použito ve formě koloidního roztoku, kde by se silikátový modul měl pohybovat v rozmezí 1-2.

Mezi další faktor ovlivňující pevnost alkalicky aktivovaných materiálů je koncentrace alkalického aktivátoru. S rostoucí koncentrací pak roste mechanická pevnost směsi [25].

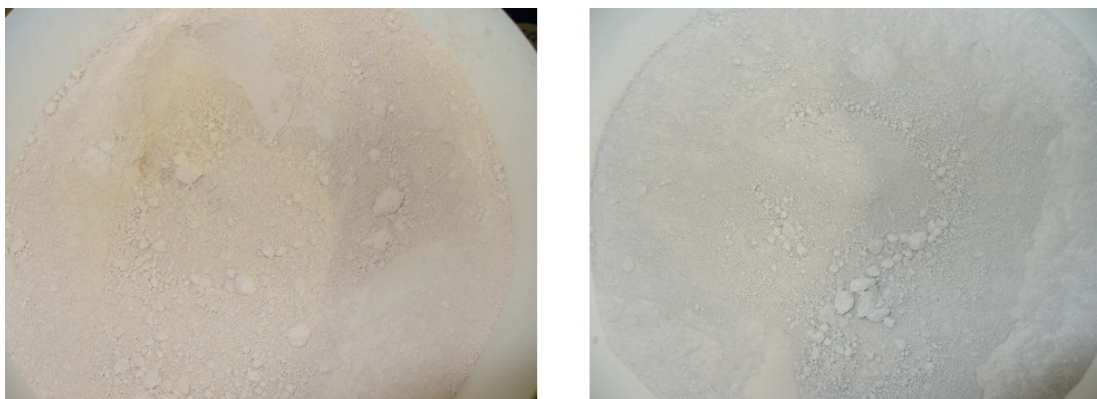
Hydroxidy sodné (NaOH) a **draselné** (KOH) jsou zásadité anorganické sloučeniny, které jsou dostupné ve formě bílých peciček nebo šupin. Tyto hydroxidy jsou silné hygroskopické látky, jež dobře rozpustné ve vodě. Jsou vyráběné průmyslově elektrolytickým rozkladem roztoků chloridů.

Vodní sklo je koloidní roztok alkalického křemičitanu (sodného či draselného), který vzniká rozpuštěním příslušného alkalicko-křemičitého skla ve vodě. Složení vodního skla je nejčastěji charakterizován křemičitým modulem M , jde o molární poměr $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ pro sklo sodné nebo $\text{SiO}_2/\text{K}_2\text{O}$ pro sklo draselné. Hodnota křemičitého modulu se pohybuje v rozmezí od 1,6 do 3,7 pro běžně vyráběná vodní skla [9].

3.3.2 Materiály vhodné pro alkalickou aktivaci

Pro alkalickou aktivaci látek se používají křemičité nebo hlinitokřemičité materiály, jež se vyznačují latentními hydraulickými vlastnostmi. Do této skupiny se řadí materiály přírodního či syntetického původu, např. aktivované kaolinické hlíny, nejčastěji metakaolin, popílký, vysokopeční struska nebo jejich směsi.

Metakaolin (obr. 12) – jedná se o vysoce reaktivní metastabilní jíl. Chemicky jde o vysoce reaktivní bezvodý hlinitokřemičitan, který je získáván tepelnou úpravou (kalcinací) kaolinu a kaolinových jíílů v rozmezí teplot 650 – 800 °C. Reaktivita metakaolinu závisí na kalcinační teplotě, která se pohybuje okolo 700°C. Jde o materiál, jenž se díky své dostupnosti pro přípravu geopolymerních systémů nejčastěji využívá [23].



Obr. 12 Ukázka komerčních metakaolinů: *Mefisto K-05 (vlevo) a Mefisto L-05 (vpravo)*

Popílký – z hlediska chemického jde o heterogenní materiály, skládající se z více komponentů o rozdílném chemickém, fyzikálním a mineralogickém složení. Mezi základní složku patří oxid křemičitý, tvořící cca 70% celkového složení. Popílký vznikají spalováním pevných paliv (např. černého a hnědého uhlí) v elektrárnách. Podle způsobu spalování se popílký rozlišují na vysokoteplotní a fluidní.

Vysokopecní struska – je vedlejším produktem při termických a spalovacích procesech. Strusky se převážně skládají z SiO_2 , Al_2O_3 a Fe_2O_3 a příměsmi sloučenin síry, fosforu a kovů. Strusky dělíme podle původu, a to na strusky vysokopecní, ocelářské a slévárenské. Některé strusky, převážně strusky ocelářské, slévárenské a strusky z výroby neželezných kovů, mají vysoký obsah sloučenin kovů.

Vulkanická struska – vzniká při vulkanické erupci, kdy část lávy díky působení okolní atmosféry a vodní páry oxiduje a rozpadá na vulkanickou strusku šedé až černé barvy s vysokým obsahem železa [24].

3.4 Vlastnosti a trvanlivost geopolymerních materiálů

Největší vliv na vlastnosti geopolymerních materiálů má charakter výchozí suroviny a taky způsob a podmínky, za kterých jsou tyto látky připravovány (teplota, hydrotermální podmínky). Kritéria, jež nejvíce ovlivňují výsledný geopolymer jsou:

- složení aluminosilikátového prekurzoru
- jemnost mletí a míra amorfního charakteru aluminosilikátů
- použitý druh alkalického aktivátoru, jeho dávka a koncentrace
- teplota a způsob ošetřování čerstvého geopolymery [21]

Geopolymery se řadí mezi hydraulická pojiva, která jsou ve vodě nerozpustné a nehořlavé, a která dobře odolávají i teplotám okolo 900 °C. Jde o materiály složené převážně z amorfních látek, s minimálním obsahem krystalických látek. V případě, že jsou materiály vystaveny vyšším teplotám, přechází jejich amorfní struktura v mikrokrytalickou. Mezi jejich výhodné vlastnosti se řadí i odolnost proti zředěným kyselinám a zásadám. Výhodou těchto materiálů je také jejich dobrá mísitelnost s plnivý a ostatními druhotnými látkami, této vlastnosti se využívá zejména při solidifikaci odpadů. Co se týče poměr plniva a pojiva, tak ten také významně ovlivňuje mechanické vlastnosti, jako je pevnost nebo pórovitost materiálu [17,22].

Složení aluminosilikátového prekurzoru charakterizuje poměr Si:Al. Se vzrůstajícím se poměrem se navyšují pevnosti v tlaku, tím se ale také prodlužuje doba tuhnutí materiálu. Při určitém zvýšení poměru pevnosti geopolymery klesají, tato hodnota se pohybuje v rozmezí 1,7-2,0. Nárůst a výsledné pevnosti jsou také ovlivněny jemností mletí výchozího aluminosilikátu [21].

Vlastnosti výsledného geopolymery mohou být ovlivněny také použitým druhem alkalického aktivátoru (složení, koncentrace). Aktivátor ovlivňuje i kinetiku geopolymery, kdy jeho pH udává rychlost a míru rozpouštění aluminosilikátového prekurzoru.

U geopolymerních materiálů se mohou pevnosti v tlaku vyvíjet i dlouhodobě, a to v rozmezí 350 až 520 dnů. Oproti běžným hydraulickým pojivům nabývají počáteční pevnosti geopolymerních materiálů mnohem rychleji. Vyskytuje se u nich jiný poměr mezi tlakovou a tahovou pevností. Důležité je také zmínit i menší náchylnost k objemovým změnám během zrání [14].

3.5 Využití geopolymery

Díky vlastnostem geopolymerních pojiv, jako je nehořlavost, vysoká pevnost nebo snadné zpracování za nízkých teplot, je lze uplatnit v celé řadě oborů. Pravděpodobně se největší využití naskytuje ve stavebnictví, kde mohou geopolymerními pojiva částečně nahrazovat klasické portlandské cementy. Ve stavebnictví je využití těchto pojiv spojeno s redukcí emisí CO₂, jenž vzniká při výrobě portlandského slínku [20].

Jedna z prvních firem zabývajících se využitím geopolymery v praxi se nazývá Cordi-Geopolymere. Tato firma byla založena profesorem Davidovitem v roce 1972. Jeho patentovaný kopolymer pro využití ve stavebnictví se nazývá Pyrament®. Jde o rychle tvrdnoucí geopolymerní beton, jenž je zatížitelný dopravou už po 4 hodinách. Tento beton se později začal míchat s OPC. Takto připravený beton obsahuje 80% portlandského cementu a 20% geopolymerní suroviny. Vytvořený beton má pak velmi dobrou počáteční pevnost a vyrábí se z něj přistávací dráhy, silnice, dálnice. Geopolymery se dají také využít ke stabilizaci tekutých odpadů, kalů, znečištěných půd. Davidovits také uvádí, že dehydrované zeolity mohou absorbovat zpět vodu do své původní struktury. Tato vlastnost je zejména u geopolymery s nízkým poměrem Si/Al = 2:1. Na základě této vlastnosti dále popisuje i možnost využití geopolymerní pěny k pasivnímu chlazení budov v teplých a suchých klimatech. U pokusů s použitím různých izolačních materiálů o stejné tepelné vodivosti měla geopolymerní pěna lepší vlastnosti než průmyslově vyráběné materiály, jako je polystyren nebo skelná vata. Na obr. 13 jsou uvedené další možnosti využití geopolymery podle poměru Si/Al.

$\begin{array}{c} \text{Si-O-Si-O-Si-O-Si-O-Si-O} \\ \\ \text{O} \\ \\ \text{-Al-} \\ \\ \text{O} \\ \\ \text{Si-O-Si-O-Si-O-Si-O-Si-O} \\ \text{20:1 < Si:Al < 35:1} \end{array}$	↑	3D uspořádání	ohnivzdorné materiály vláknové kompozity
$\left[\begin{array}{c} \text{-Si-O-Al-O-Si-O-} \\ \\ \text{O} \\ \\ \text{-Si-} \\ \\ \text{O} \\ \\ \text{O} \end{array} \right] \text{ (F, SiO}_2\text{)}$ <p>Si:Al > 3:1</p>	↑	Polymerní charakter	těsnění pro průmysl odolné v rozmezí 200-600 °C kompozity v letectví
$\left[\begin{array}{c} \text{-Si-O-Al-O-Si-O-} \\ \\ \text{O} \\ \\ \text{-Si-} \\ \\ \text{O} \end{array} \right]$ <p>Si:Al 3:1</p>	↑		teplotně odolné materiály 200-1000 °C požární ochrana - skelná vlákna
(-Si-O-Al-O-Si-O) <p>Si:Al 2:1</p>	↑	2D uspořádání	cementy, betony (> CO ₂) imobilizace toxických radioaktivních odpadů
(-Si-O-Al-O) <p>Si:Al 1:1</p>	↑		cihly, keramika požární ochrana

Obr. 13 Možné využití geopolymérů dle poměrů Si/Al [26]

Další možností pro využití geopolymérů se naskytá při restaurování sochařských a stavebních památek z kamene, keramiky či umělého kamene. Výhodou těchto geopolymerních pojiv je velká možnost modifikací vzhledu, a to v závislosti na použitém plnivu či přídavku barviv [20,22].

V neposlední řadě lze také geopolymery využít i v automobilovém nebo leteckém průmyslu pro výrobu součástí. Často se zmiňuje i možnost stabilizace a solidifikace odpadů za použití geopolymérů, vzhledem k jejich dlouhé životnosti, vysoké odolnosti a schopnosti vázat velké množství plniva [20].

4. Přírodní pískovec

Pískovce se řadí mezi klastické (úlomkové) zpevněné sedimenty o velikosti jednotlivých zrn 0,063-2 mm. Pískovce můžeme podle velikosti zrn rozdělit na jemnozrnné (0,063 – 0,5 mm), střednězrnné (0,5 – 1,0 mm) a hrubozrnné (zrna nad 1 mm). Zrna obsažená v pískovci mohou být křemenná a v menší míře i kalcitická.

Prosto mezi zrny může být jak volný tak i vypojen pojivem. Za pojivo je považována strukturně odlišná, jemnozrnná složka sedimentární horniny, jenž kameni dodává soudržnost. Tato složka je buď to primární (usazená zároveň i s klastickými zrny) nebo druhotná (usazená dodatečně). Primární pojivo se nazývá základní hmotou a druhotné pojivo je nazýváno tmelem. Výplňový tmel můžeme rozdělit do čtyř skupin na:

- **Dotykový** tmel spojující jednotlivá zrna, a kdy prostor mezi zrny zůstává volný.
- **Povlakový** tmel (krustifikační) obalující zrno po celém jeho povrchu, a kdy prostor mezi zrny zůstává i nadále volný.
- **Pórový** tmel, jenž působí jako základní materiál, v jehož struktuře jsou obsažena zrna pískovce.
- **Výplňový** tmel vyplňující zbylý prostor mezi zrny.

Tak jako u umělých kamenů, má i u přírodního pískovce rozhodující vliv na vlastnosti kamene množství a kvalita tmele. S množstvím tmele se výrazně mění pórovitost a mechanické vlastnosti horniny. Podle složení tmele dostane pískovec své charakteristické zabarvení, například v případě, kdy jsou pískovce pojené železitým tmelem je jejich barva červenohnědá, u nás je běžnější barva šedobílá až šedá, která je výsledkem zpevnění vápenatým tmelem.

Těžba pískovců v některých regionech probíhala až do počátku 20. století. Mezi nejznámější způsoby těžby pískovcového kamene patřilo dobývání, kdy se pískovcové bloky získávaly podkopáváním paty skalního masívu nebo postupným odlamováním shora nebo zdola. Dalšími způsoby těžby přírodního kamene patří i páčení pomocí sochorů a břeven. Dále sem patří rovněž šramování a podštolování s hromadným odstřelem, které přišlo na řadu až v pozdější době kvůli technické a finanční náročnosti [9].

4.1 Vybrané druhy pískovců používané v České republice

4.1.1 Hořický pískovec

Hořický pískovec (obr. 14) je jemnozrnný křemenný pískovec, který se nachází v severní oblasti české křídý. Jednotlivá zrna pískovce spojuje kaoliniticko-křemenný tmel, šedobílé až žluté barvy, místy i nazelenalé nebo červenohnědé barvy.

Vlastnosti pískovce jdou velmi proměnlivé v závislosti na jednotlivých vrstvách, ale taky i na poloze v dané vrstvě. Pevnosti těchto pískovců se podle posledních průzkumů pohybují v rozmezí od 20 do 41 MPa.

U nás je hořický pískovec velmi oblíbeným materiálem pro staticky nenamáhané stavební a architektonické aplikace. Tento pískovec se používá také v kamenosochařské výrobě pro tvorbu nových i kopie starých děl. Hořický pískovec se těží v lokalitě Podhorní Újezd u Hořic [28,37].



Obr. 14 Hořický pískovec [37]

4.1.2 Mšenský pískovec

Dalším pískovcem pocházející z oblasti české křídý je mšenský pískovec (obr. 15). Jedná se opět o jemnozrnný pískovec, barvy bělošedé, žluté až červenohnědé. Tento pískovec bývá také často žíhaný nebo se skvrnami. Pevnost mšenského pískovce se pohybuje kolem 28 MPa.

Mšenský pískovec se používá jak ve stavebnictví, tak v kamenosochařství. Jedním z příkladů využití tohoto pískovce v restaurátorství je reliéf tympanonů na vchodu hlavního průčelí v chrámu svatého Víta v Praze [28,38].



***Obr. 15** Mšenský pískovec [38]*

4.1.3 Božanovský pískovec

Jedná se o středně až hrubě zrnitý pískovec, převážně béžové, šedobílé nebo naopak rezavě hnědé barvy se skvrnami nebo žíháním. Božanovský pískovec pochází z oblasti Broumovského výběžku. Díky hrubší zrnitosti je možné rozeznat zrna křemene, plagioklasu a draselných živců.

Božanovský pískovec (obr. 16) patří z hlediska technologického mezi naše nejkvalitnější pískovce, pevnost v tlaku se totiž pohybuje v rozmezí od 65 do 72 MPa. Tento pískovec má velice široké uplatnění ve stavebnictví i v kamenosochařské výrobě, kde je ale jeho použití omezeno jeho hrubší zrnitostí. V dnešní době probíhá těžba na území obce Božanov [28,39].



***Obr. 16** Božanovský pískovec [39]*

5. Praktická část

Praktická část dokumentu se zabývá výrobou směsí umělého kamene s využitím geopolymerního pojiva na bázi metakaolínu a následným zkoušením mechanických a fyzikálních vlastností tohoto materiálu.

5.1 Použité suroviny

Veškeré zkoušky byly provedeny na dvou druzích směsí umělého kamene. Vzorky byly vytvořeny ze směsi zlatého a běžného písku s použitím geopolymerního pojiva na bázi metakaolínu (obr. 17). Oba druhy písku byly použity ve dvou frakcích (0,25 a 0,5 mm) v poměru 1:1.

- Metakaolin I META 4 – vyrobený společností Sedlecký kaolin
- Zlatý písek – jedná se o odpadní produkt z těžby kaolinu. Tento písek je tvořen dále hlavně křemenem a živcem. Tento písek může po krátké době ve venkovním prostředí měnit barvy, může být žluto-hnědý, zlatožlutý či dokonce červený, a to díky snížení hodnot pH pískového výluhu. Chemické složení použitého písku je uvedeno v tabulce 1.
- Běžný písek – jde o běžný stavební písek
- Desil Al - koloidní roztok s přídavkem hliníku (Vodní sklo, a.s.)



Obr. 17 Použité suroviny – metakaolin (vlevo), běžný písek, zlatý písek (vpravo)

Tabulka 1 Chemické složení zlatého písku

Parametr	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	L.I.
wt %	92,46	3,82	0,99	0,10	0,02	0,05	1,04	0,07	1,35

5.2 Složení směsí

Tabulka 2 Složení směsí umělého pískovce s geopolymerním pojivem

	Složka	Hmotnost [g]
Směs A	Běžný písek frakce 0,25 + 0,5 v poměru 1:1	1400
	Metakaolin	100
	Vodní sklo – Desil Al	100
Směs B	Zlatý písek frakce 0,25 + 0,5 v poměru 1:1	1400
	Metakaolin	100
	Vodní sklo – Desil Al	200

5.3 Příprava zkušebních vzorků

Zkušebními vzorky byly trámečky o rozměrech 40 x 40 x 160 mm (obr. 18). Před přípravou jednotlivých směsí se musel nejprve připravit písek, který se musel pomocí sít přesítovat na požadovanou frakci, kterou jsme potřebovali, a to na frakci 0,5 a 0,25. Poté už se mohli jednotlivé směsi začít připravovat.

Při přípravě jednotlivých směsí byl v míchačce (obr. 19) vždy nejprve smíchán metakaolin s vodním sklem a následně po homogenizaci těchto dvou složek se přimíchával písek v příslušném množství. Výsledná směs se poté ručně plnila do předem vymazaných forem (obr. 20) a pomocí malého dřevěného kvádru a kladívka se udusávala tak, aby byla směs dostatečně hutná a forma byla zcela naplněná.

Po naplnění byly jednotlivé vzorky označeny a uloženy do vlhkostní skříně. Přibližně po 72 hodinách byly zkušební vzorky odformovány a opět uloženy zpět do vlhkostní skříně.



Obr. 18 Sada zkušebních trámeček velikosti 40x40x160 mm



Obr. 19 Míchačka pro přípravu směsi



Obr. 20 Forma pro přípravu trámeček

5.4 Použité zkušební metody

Jednotlivé vzorky byly po 7, 14 a 28 dnech podrobeny zkouškách pevnosti v tlaku a pevnosti v tahu ohybem. Tyto zkoušky nebyly prováděny podle norem pro umělý kámen, z důvodu, že jsme neměli tělesa v rozměrech, které norma pro umělý kámen požaduje. Pro tyto zkoušky se použila norma ČSN EN 196-1 Metody zkoušení cementu. U obou směsí byla dále stanovena nasákavost, zdánlivá pórovitost a mrazuvzdornost. Část vzorku

z každé směsi byla také podrobena analýze pod elektronovým mikroskopem a analýze pomocí tomografu. Na obou směsích bylo také stanoveno pH.

5.4.1 Zkouška pevnosti v tahu ohybem

Zkouška pevnosti v tahu ohybem byla stanovena podle normy ČSN EN 196-1 [2]. Zkouška byla prováděna na zatěžovacím lisu skládajícího se ze dvou válcových podpor o průměru 10 mm, vzdálených od sebe $100 \pm 0,5$ mm. Na tyto podpory se pak umístily trámečky o rozměrech 40 x 40 x 160 mm (obr. 21), trámečky se umísťují kolmo na směr plnění. V horní části lisu se pak nachází další válec o průměru 10 mm, kterým byly trámečky zatěžovány až do porušení, kdy se trámeček zlomil na dvě části (obr. 22). V okamžiku porušení se zaznamenala maximální hodnota zatížení v N. Pevnost v tahu ohyhem pak byla vypočítána z následujícího vztahu:

$$R_f = \frac{3 \cdot F \cdot l}{2 \cdot b \cdot h^2} \quad \left[\frac{N}{mm^2} \right] \quad (2)$$

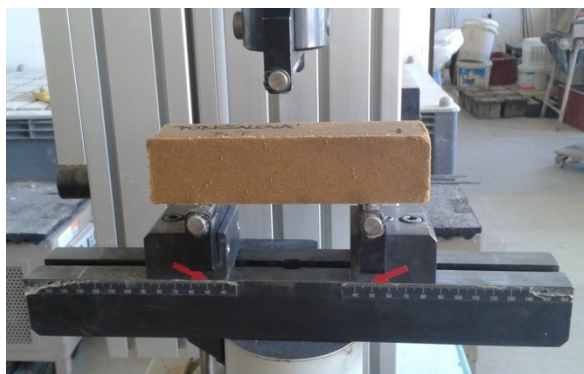
kde: F ... vynaložené zatížení v okamžiku porušení tělesa [N]

b ... šířka trámečku [mm]

h ... výška trámečku [mm]

l ... vzdálenost mezi podporami [mm]

Průměrná hodnota se vypočítá s přesností 0,1 N/mm².



Obr. 21 Zkoušený trámeček před provedením zkoušky pevnosti v tahu za ohybu



Obr. 22 Zkoušený trámeček po provedení zkoušky pevnosti v tahu za ohybu

5.4.2 Zkouška pevnosti v tlaku

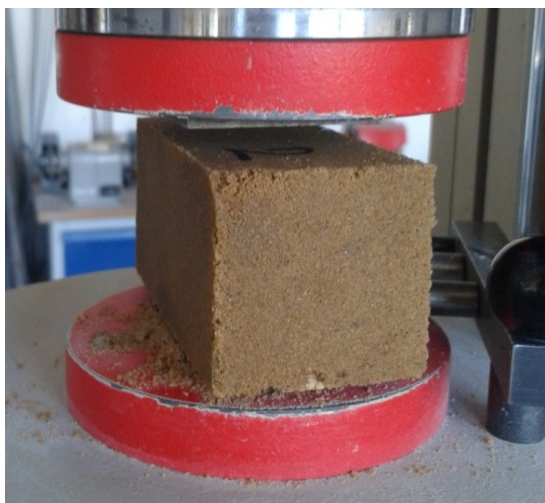
Zkouška pevnosti v tlaku se stanovovala dle normy ČSN EN 196-1 [2]. Zkouška se prováděla na stejném zatěžovacím lise, stejně jako zkouška pevnosti v tahu ohybem. Zlomky těles vzniklé z tahové zkoušky se umístili do zkušebního zařízení kolmo na směr plnění tak, aby plocha zkušebního stroje dosedla na jednu stranu šířky trámečku (obr. 23). Zlomky se pak postupně zatěžovaly až do porušení a zaznamenala se maximální hodnota zatížení v N, při které byl zlomek porušen (obr. 24). Příslušná pevnost v tlaku pak byla vypočítána z následujícího vztahu:

$$R_c = \frac{F}{A} \quad [N/mm^2] \quad (3)$$

kde: F ... zatěžovací síla v okamžiku porušení [N]

A ... zatěžovací plocha 1600 mm²

Průměrná hodnota se vypočítá s přesností 0,1 N/mm².



***Obr. 23** Zkoušený vzorek před provedením zkoušky pevnosti v tlaku*



***Obr. 24** Zkoušený vzorek po provedení zkoušky pevnosti v tlaku*

5.4.3 Zkouška mrazuvzdornosti

Zkouška nasákavosti se stanovovala podle normy ČSN EN 14617-5 [4]. Zkušební tělesa byla nejprve ponořena do vody na dobu 24 hodin. Vodou nasáklá zkušební tělesa se poté umístila do mrazicího boxu (obr. 25). Po dosažení teploty $(-20 \pm 5)^\circ\text{C}$ se zkušební

tělesa ponechala v mrazícím boxu po dobu 4 hodin. Po té byla zmrazená tělesa ponořena do vody o teplotě $(20 \pm 5)^{\circ}\text{C}$. Po dosažení této teploty se zkušební tělesa nechala ponořena po dobu 2 hodin.

Bylo vykonáno 25 těchto zmrazovacích a rozmrazovacích cyklů. Po ukončení posledního cyklu byla zkušební tělesa vyjmuta a vložena do sušárny, kde se nechala vysušit do ustálené hmotnosti a poté byla na těchto tělesech provedena zkouška pevnosti v tahu ohybem podle normy ČSN EN 196-1 [2].

Změna vlastností se pak stanovila podle následujícího vztahu:

$$KM_{f25} = \frac{RM_f}{R_f} \times 100 \quad [\%] \quad (4)$$

kde: RM_f ... průměrná hodnota pevnosti za ohybu zkušebních těles po 25 zmrazovacích a rozmrazovacích cyklech [MPa]

R_f ... průměrná hodnota pevnosti za ohybu nezmrazených zkušebních těles [MPa]

Výsledek se zaokrouhlí na nejbližší 0,1%.



Obr. 25 Zkušební tělesa umístěna v mrazícím boxu

5.4.4 Zkouška nasákavosti

Zkouška nasákavosti byla prováděna podle normy ČSN EN 14617-1 [3]. Zkoušené vzorky byly nejprve vloženy do sušárny, a vysušeny do ustálené hmotnosti a zváženy. Po jejich vysušení byly zkušební vzorky umístěny do nádoby a zality vodou tak, aby hladina vody byla 2 cm nad ponořenými tělesy. Zkušební tělesa byla po 24 hodinách od začátku zkoušky vyjmuta z vody, otřena vlhkou látkou a zvážena na vzduchu. Výsledná nasákavost se pak vypočítala z následujícího vztahu:

$$C = \frac{100 \times (M_t - M_0)}{M_0} \quad [\%] \quad (5)$$

kde: M_t ... hmotnost nasyceného a povrchově osušeného vzorku [g]

M_0 ... hmotnost vysušeného vzorku [g]

Výsledek se zaokrouhlí na nejbližší 0,1%.

5.4.5 Zkouška zdánlivé pórovitosti

Zdánlivá pórovitost stanovuje poměr otevřených pórů a dutin vzorku k jeho celkovému objemu včetně všech pórů a dutin.

Zkoušené vzorky byly nejprve vloženy do sušárny, a vysušeny do ustálené hmotnosti a zváženy. Po jejich vysušení byly zkušební vzorky umístěny do nádoby a zality vodou tak, aby hladina vody byla 2 cm nad ponořenými tělesy. Zkušební tělesa byla po 24 hodinách od začátku zkoušky zvážena ve vodě na hydrostatických vahách a poté vyjmuta z vody, otřena vlhkou látkou a ještě zvážena na vzduchu (obr. 26). Výsledná pórovitost se pak vypočítala z následujícího vztahu:

$$PZ = \frac{100 \times (m_n - m_s)}{m_n - m_{nw}} \quad [\%] \quad (6)$$

kde: m_s ... hmotnost vysušeného vzorku [g]

m_n ... hmotnost nasyceného a povrchově osušeného vzorku [g]

m_{nw} .. hmotnost nasyceného vzorku váženého ve vodě [g]

Výsledek se zaokrouhlí na nejbližší 0,1%.



Obr. 26 Vážení vzorků na hydrostatické váze

5.4.6 Stanovení pH pískovců a použitých písků

U obou typů použitých písků i u obou vyrobených pískovců se stanovovalo jejich pH. Zkouška spočívala v nadrcení písků v hmoždíři, nasypání podrceného písku do nádoby, která se poté dolila destilovanou vodou a 24 hodin se nechala na třepacím stole třepat (obr. 27). Jen u vytvořených pískovců byla část vzorku rozemleta v mlýnku.

Po 24 hodinách byly vzorky vyjmuty z třepacího stroje a vyluhovány (obr. 28). Nakonec se pomocí pH přístroje z výluhu stanovilo pH obou typů písků a vytvořených pískovců.



Obr. 27 Třepací stůl



Obr. 28 Vyluhování vzorků

5.5 Zpracování a vyhodnocení zkoušek

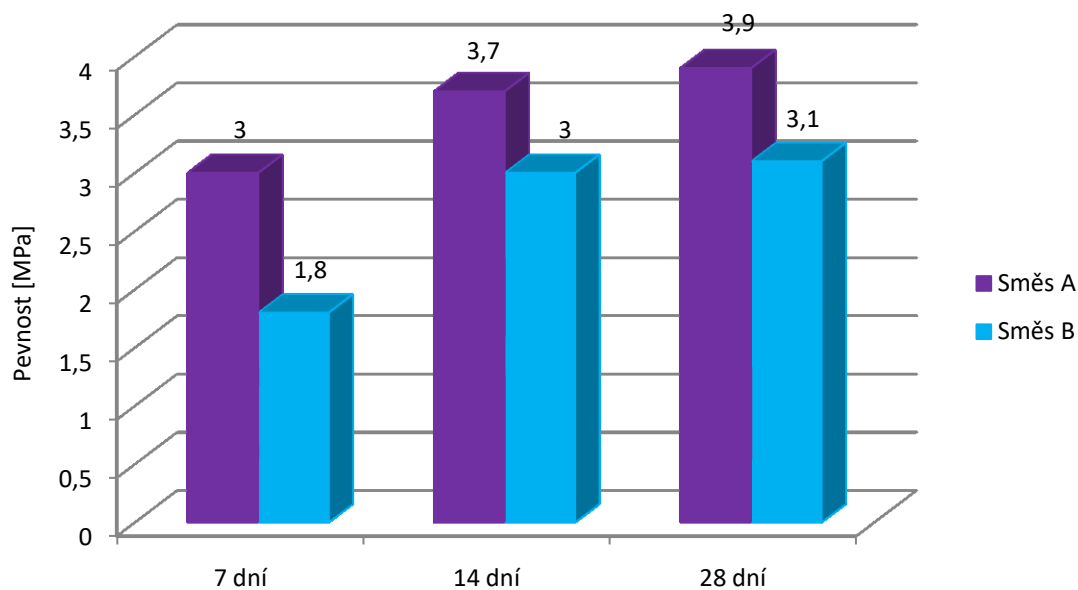
5.5.1 Výsledné pevnosti připravených pískovců

Z provedených zkoušek byly vyhodnocené mechanické vlastnosti jednotlivých směsí, jako je pevnost v tahu ohybem a pevnost v tlaku. Zkoušené pevnosti byly provedeny na obou typech připravených pískovců. Zkoušky byly provedeny na trámečcích o rozměrech 40x40x160 mm po 7, 14 a 28 dnech jejich zrání. Všechny výsledky zkoušek jsou uvedeny v tabulce 3 a 4, a také graficky znázorněny na obr. 29 a 30.

Tabulka 3 Vyhodnocení zkoušek pevnosti v tahu ohybem

		Vzorek	Rozměry [mm]			Hmotnost [g]	Lomová síla F [kN]	Pevnost v tahu ohybem [MPa]	
			a	b	h			R _f	Ø R _f
Směs A	7 dní	1	162	40	41	494,5	1,4	3,1	3,0
		2	162	39	40	478,0	1,3	3,1	
		3	161	40	41	487,5	1,2	2,7	
	14 dní	1	160	40	41	472,0	1,7	3,7	3,7
		2	160	40	41	466,0	1,6	3,5	
		3	160	40	39	462,5	1,6	3,9	
	28dní	1	161	41	40	479,0	1,7	4,0	3,9
		2	161	41	41	477,5	1,7	3,9	
		3	161	41	41	475,0	1,6	3,7	
Směs B	7 dní	1	160	40	39	502,5	0,7	1,7	1,8
		2	160	40	41	508,5	0,8	1,8	
		3	160	40	39	506,0	0,8	1,9	
	14 dní	1	161	40	41	517,5	1,3	3,0	3,0
		2	161	40	40	510,5	1,3	3,1	
		3	160	40	40	520,5	1,3	3,0	
	28dní	1	161	40	41	512,0	1,3	3,1	3,1
		2	161	40	41	511,0	1,3	3,0	
		3	161	40	41	518,0	1,4	3,3	

Srovnání pevností v tahu ohybem

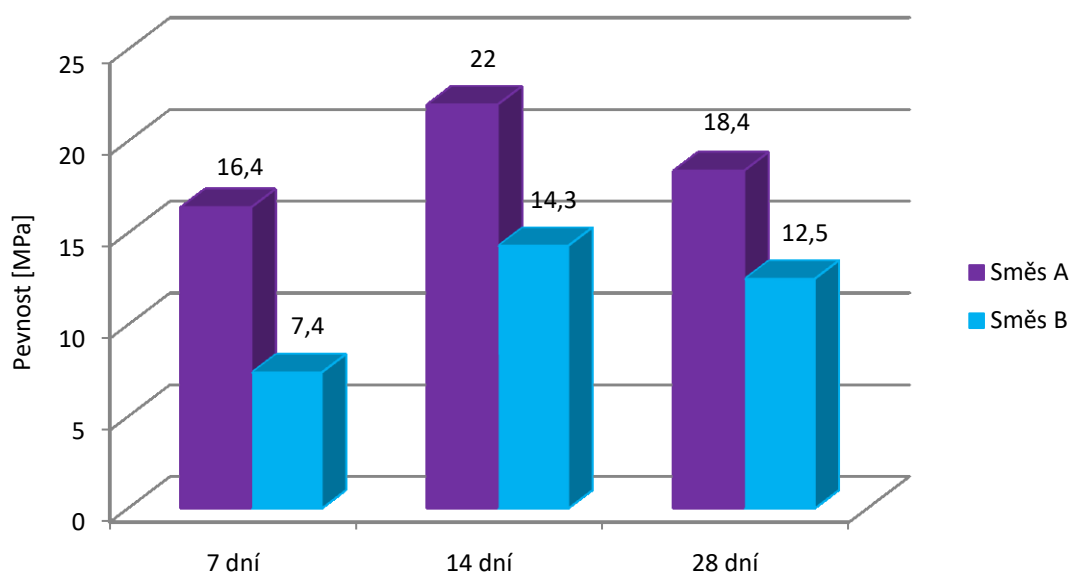


Obr. 29 Pevnosti v tahu ohybem obou typů pískovců

Tabulka 4 Vyhodnocení zkoušek pevnosti v tlaku

	Vzorek	Rozměry [mm]			Hmotnost [g]	Lomová síla F [kN]		Pevnost v tlaku [MPa]	
		a	b	h				R _c	Ø R _c
Směs A	7 dní	1	162	40	41	494,5	29,9 30,0	18,7 18,8	16,4
		2	162	39	40	478,0	26,3 26,3	16,4 16,5	
		3	161	40	41	487,5	22,9 21,9	14,3 13,7	
	14 dní	1	160	40	41	472,0	32,1 33,9	20,1 21,1	22,0
		2	160	40	41	466,0	37,6 41,1	23,5 25,7	
		3	160	40	39	462,5	29,9 36,7	18,7 22,9	
	28 dní	1	161	41	40	479,0	30,1 31,2	18,8 19,5	18,4
		2	161	41	41	477,5	31,3 30,2	19,6 18,9	
		3	161	41	41	475,0	27,0 26,7	16,9 16,7	
Směs B	7 dní	1	160	40	39	502,5	11,5 11,9	7,2 7,4	7,4
		2	160	40	41	508,5	12,2 11,6	7,6 7,2	
		3	160	40	39	506,0	11,6 12,9	7,2 8,0	
	14 dní	1	161	40	41	517,5	22,2 19,5	13,9 12,2	14,3
		2	161	40	40	510,5	12,5 20,7	19,9 12,9	
		3	160	40	40	520,5	20,4 22,5	12,8 14,1	
	28 dní	1	161	40	41	512,0	18,9 18,5	11,8 11,6	12,5
		2	161	40	41	511,0	18,2 21,3	11,4 13,3	
		3	161	40	41	518,0	20,4 22,4	12,8 14,0	

Srovnání pevností v tlaku



Obr. 30 Pevnosti v tlaku obou typů pískovců

Z vyhodnocení zkoušek se dá usoudit, že nejlepších pevností jak v ohybu, tak i v tlaku dosáhla směs A.

Podle grafického výstupu je patrný nárůst pevností u obou směsí u pevnosti ohybem. Naopak u pevností v tlaku, si můžeme všimnout mírného poklesu pevnosti ze 14tého na 28 den. Důvodem může být, že zkušební tělesa byla po celou dobu zrání umístěna ve vlhkostní skříni, odkud byla vždy vyjmuta a odzkoušena. Zkušební tělesa nebývala před zkouškou vysušena.

Před rozhodnutím, jakým způsobem budou směsi do forem plněny, byly odzkoušeny dva způsoby. Jedním způsobem bylo plnění ručně pomocí dřevěného dusadla a kladívka (tento způsob nakonec vybrán). Druhým způsobem bylo stlačení směsi pomocí lisu. Oba tyto způsoby byly podrobeny zkoušce v pevnosti, a rozdíl v pevnosti nebyl nijak velký. Čímž se dá usoudit, že způsob plnění směsi do forem, nemělo značný význam na pevnosti pískovců.

5.5.2 Výsledná nasákavost pískovců

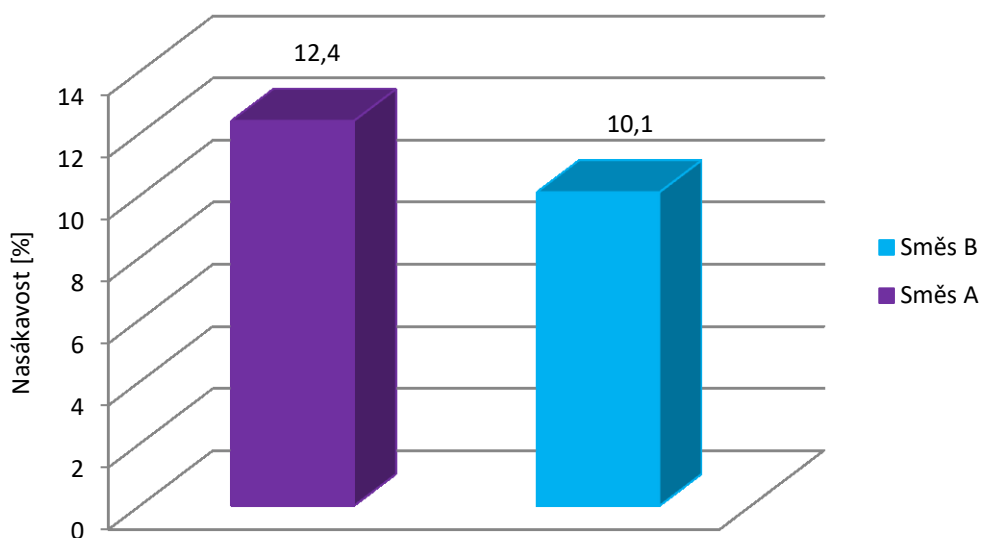
Zkouška byla prováděná na třech zkušebních tělesech z každé směsi. Výsledky zkoušky zkušebních těles jsou uvedeny v tabulce 5 a graficky znázorněny na obr. 31.

Tabulka 5 Vyhodnocení nasákavosti

Vzorek	Rozměry [mm]			Hmotnost zkušebního vysušeného tělesa M_0 [g]	Hmotnost zkušebního nasyceného tělesa M_t [g]	Nasákavost [%]
	a [mm]	b [mm]	h [mm]			
Směs A	1	160	40	458,0	513,4	12,1
	2	160	41	452,4	507,2	12,1
	3	160	41	451,4	509,6	12,9
Průměrná nasákavost						12,4
Směs B	1	160	39	471,8	520,6	10,3
	2	161	40	475,6	523,4	10,1
	3	160	40	472,0	519,2	10,0
Průměrná nasákavost						10,1

Z vyhodnocení zkoušky se dá usoudit, že umělý kámen vytvořený ze směsi B je méně nasákavý, než kámen vytvořený ze směsi A. Rozdíl mezi těmito dvěma směsi však není velký. Důsledkem bude různá objemová hmotnost použitých písků.

Srovnání nasákavosti



Obr. 31 Nasákavost obou typů pískovců

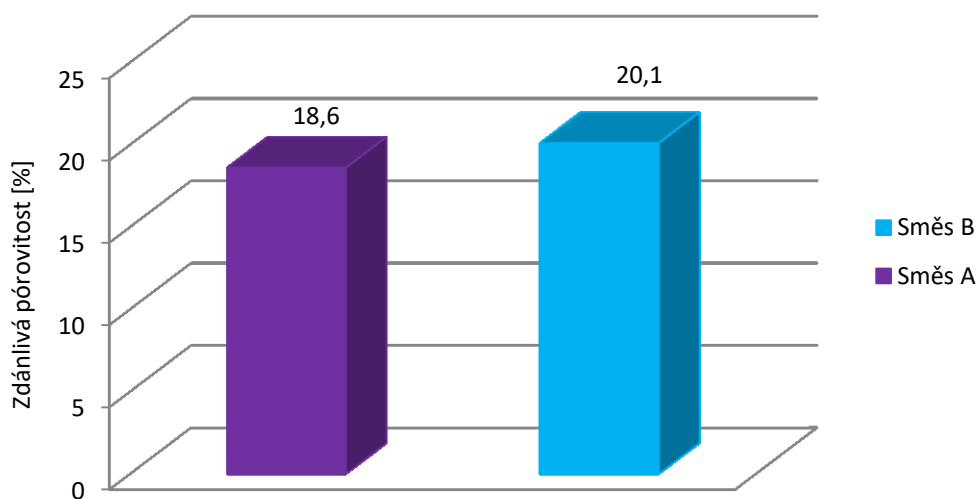
5.5.3 Výsledná zdánlivá pórovitost

Zkouška byla prováděna na třech zkušebních tělesech z každé směsi. Výsledky zkoušky zkoušených těles jsou uvedeny v tabulce 6 a graficky znázorněny na obr. 32.

Tabulka 6 Vyhodnocení zdánlivé pórovitosti

	Vzorek	Hmotnost vysušeného tělesa m_s [g]	Hmotnost nasyceného tělesa váženého na vzduchu m_n [g]	Hmotnost nasyceného tělesa váženého ve vodě m_{nw} [g]	Zdánlivá pórovitost [%]
Směs A	1	455,8	516,4	209,5	18,7
	2	450,0	511,6	206,7	18,6
	3	449,0	511,3	203,7	18,4
	Průměrná zdánlivá pórovitost				18,6
Směs B	1	461,4	519,5	209,5	19,7
	2	465,0	522,7	212,7	20,2
	3	461,2	518,0	209,7	20,3
	Průměrná zdánlivá pórovitost				20,1

Srovnání zdánlivé pórovitosti



Obr. 32 Zdánlivá pórovitost obou typů pískovců

Z vyhodnocení zkoušky můžeme vidět, že nejlépe je na tom umělý pískovec vytvořený ze směsi A. Rozdíl v pórovitosti mezi oběma typy vytvořených pískovců však není velký. U směsi B může být příčinou větší pórovitosti, to že směs byla do forem plněna a dusána ručně, takže u téhle směsi mohla být vyvíjena menší síla u plnění, než při tvorbě pískovců ze směsi A.

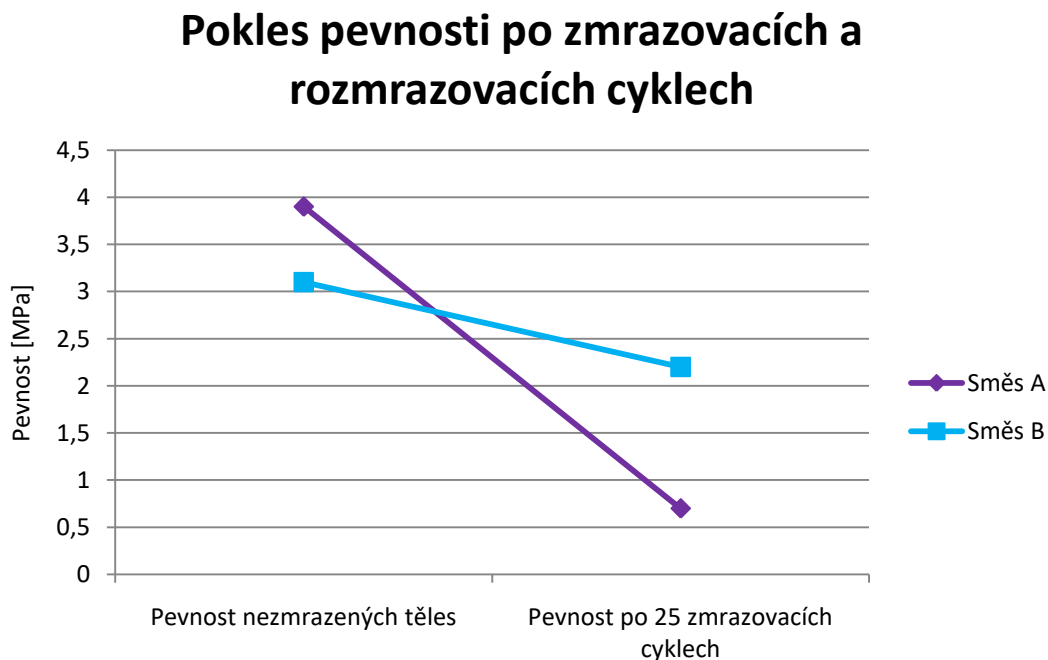
Zkušební tělesa tvořená ze směsi B se také hůře dusala, kvůli o něco horší konzistenci oproti směsi A. I při použití více vodního skla pro lepší konzistenci, měla směs A konzistenci o něco lepší, proto se vzorky také o něco lépe připravovaly a dusaly.

5.5.4 Výsledná mrazuvzdornost pískovců

Zkouška byla prováděna na třech zkušebních tělesech z každé směsi. Podstatou zkoušky bylo stanovení poměru mezi pevností za ohybu zkušebních těles po 25 zmrazovacích a rozmrazovacích cyklech a zkušebních tělesech, které nebyly vystaveny zmrazovacím cyklům. Všechny výsledky zkoušky jsou uvedeny v tabulce 7 a 8, a jejich grafické znázornění je zobrazeno na obr. 33 a 34.

Tabulka 7 Vyhodnocení mrazuvzdornosti pro pevnost v tahu ohybem

	Vzorek	Rozměry [mm]		Lomová síla F [kN]	Pevnost za ohybu po 25 zmrazovacích cyklech		Stanovení mrazuvzdornosti
		b [mm]	h [mm]		RM _f [MPa]	Ø RM _f [MPa]	KM _{f25} [%]
Směs A	1	41,1	39,5	0,252	0,6	0,7	17,9
	2	40,9	39,6	-	-		
	3	40,2	39,8	0,301	0,7		
Směs B	1	40,4	38,3	0,931	2,2	2,2	70,9
	2	40,4	37,6	0,954	2,2		
	3	40,1	36,3	0,927	2,2		

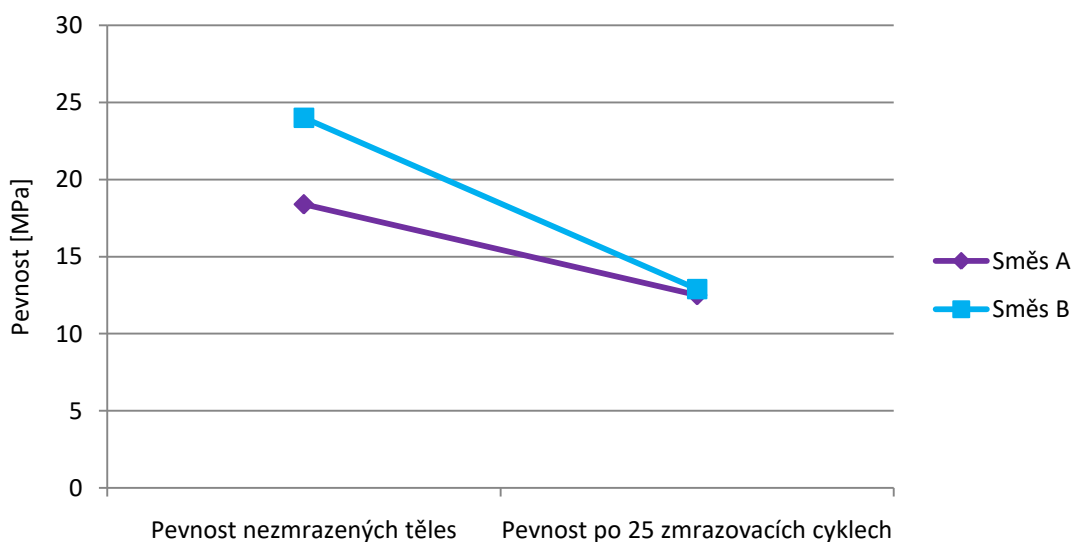


Obr. 33 Pokles pevnosti v tahu ohybem po 25 zmrazovacích a rozmrazovacích cyklech obou pískovců

Tabulka 8 Vyhodnocení mrazuvzdornosti pro pevnost v tlaku

	Vzorek	Rozměry [mm]		Lomová síla F [kN]		Pevnost v tlaku po 25 zmrazovacích cyklech			Stanovení mrazuvzdornosti
		b [mm]	h [mm]			RM _c [MPa]	Ø RM _c [MPa]		KM _{c25} [%]
Směs A	1	41,1	39,5	39,8		24,9	-		130,4
	2	40,9	39,6	37,9		23,7	-	24	
	3	40,2	39,8	37,4		23,4	-		
Směs B	1	40,4	38,3	19,1	22,5	11,9	14,0		103,2
	2	40,4	37,6	20,4	22,4	12,7	14,0	12,9	
	3	40,1	36,3	19,1	21,1	11,9	13,2		

Pokles pevnosti po zmrazovacích a rozmrazovacích cyklech



Obr. 34 Pokles pevnosti v tlaku po 25 zmrazovacích a rozmrazovacích cyklech obou pískovců

Během zkoušky nebyly na zkušebních tělesech, až na jedno zkušební těleso směsi A, zaznamenány žádné výrazné degradační procesy způsobené střídavým působením mrazu. Pouze jedno zkušební těleso v zmrazovacích a rozmrazovacích cyklech neobstálo a v 16 cyklu bylo porušeno (obr. 35). Po 25 zmrazovacích cyklech byl na zkušebních tělesech směsi B zpozorován menší úbytek materiálu a to zhruba 6% (obr. 36). Pevnost v ohybu u směsi B poklesla pouze o 29% oproti referenčním vzorkům. Hodně výrazný pokles pevnosti v ohybu nastal u směsi A, kde pevnost klesla o 82%. Důvodem bylo lehké porušení vzorků, kdy se na povrchu vzorků nalézaly nepatrné trhlinky.



Obr. 35 Porušení vzorku v 16 cyklu



Obr. 36 Úbytek materiálu na vzorcích směsi B

V tabulce 5 jsou možné vidět výsledky pevnosti v tlaku obou typů pískovců po 25 zmrazovacích a rozmrazovacích cyklech. Bohužel tyto výsledky nejsou adekvátní, z důvodu, že vzorky zkoušené na pevnost po zmrazovacích cyklech byly před zkouškou pevnosti vysušeny a referenční vzorky, podle kterých měla být daná zkouška srovnávána, vysušeny nebyly a byly rovnou ke zkoušce pevnosti odebrány z vlhkostní skříně. Proto v tabulce vidíme, že pevnost u obou směsí se zvýšila, místo toho aby byla nižší.

5.5.5 Výsledné pH pískovců a použitých písků

U obou typů použitých písků i u obou vyrobených pískovců bylo stanoveno jejich pH. Výsledné hodnoty jsou uvedeny v tabulce 9.

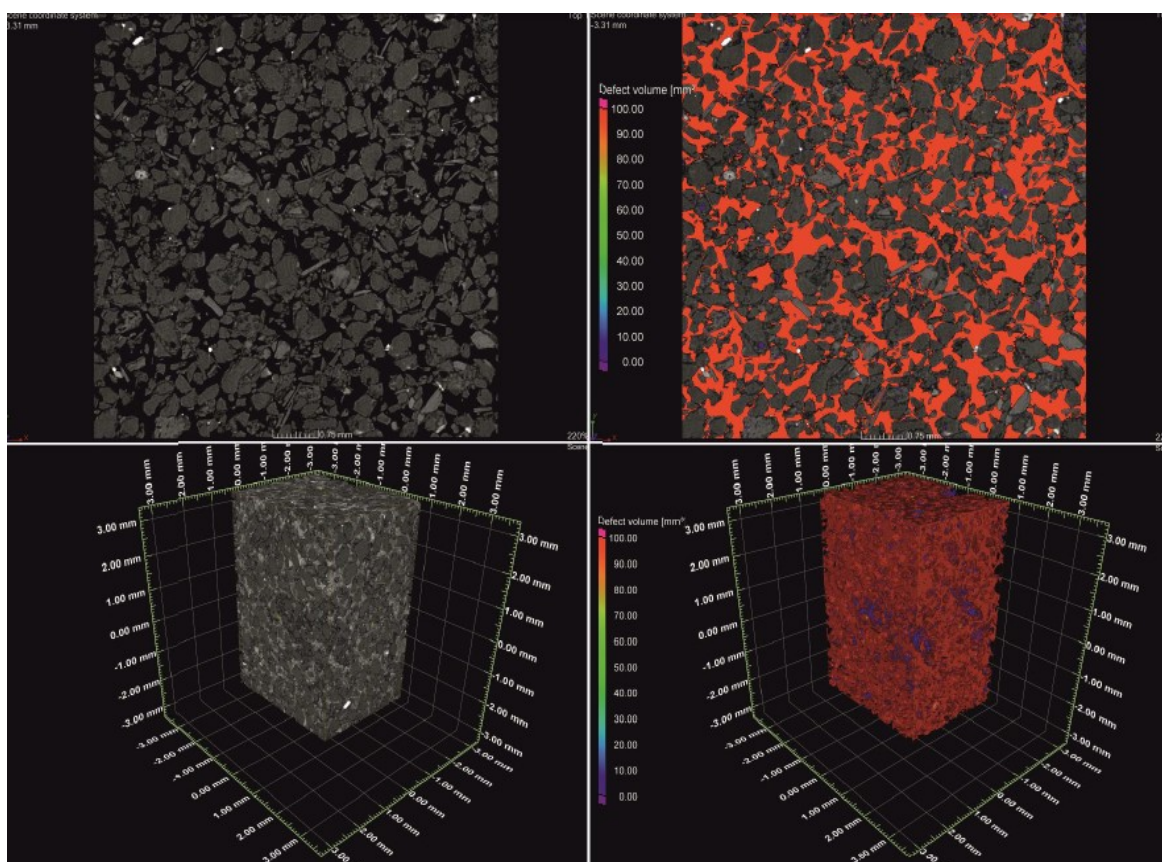
Tabulka 9 Vyhodnocení pH

	Běžný písek	Zlatý písek	Pískovec ze směsi A	Pískovec ze směsi B
pH	6,70	6,77	11,97	12,15

Z tabulky si můžeme všimnout, že pH mezi použitými písky se moc neliší. Neliší se také moc mezi vytvořenými pískovci. Největší změna nastala mezi použitým pískem a jím vytvořeným pískovcem, kde nám přidání metakaolinu a vodního skla pH změnilo. Přidáním metakaolinu a vodního skla změnilo pH z neutrálního roztoku na zásaditý.

5.5.6 Analýza pomocí rentgenové počítačové tomografie

Rentgenovou CT byla provedena studie vnitřní struktury uměle připravovaného pískovce pomocí XT H 225 ST průmyslového mikro-tomografického systému. Studie byla prováděná na řezaných vzorcích o rozměrech 10x10x20 mm. Analýza byla zaměřena pórovitost a rozložení velikosti pórů uměle připravovaného pískovce, kdy charakter pórů je jedním z faktorů určující odolnost proti povětrnostním vlivům. Na vybraném rentgenovém snímku CT 2D a 3D (obr. 37) můžeme vidět vizualizaci prostoru pórů a pórovitost studovaného pískovce. Z rentgenových snímků můžeme dále vidět rovnoměrnou pórovitost vytvořeného pískovce a dále také, že struktura pískovce je bez výrazných nehomogenit.

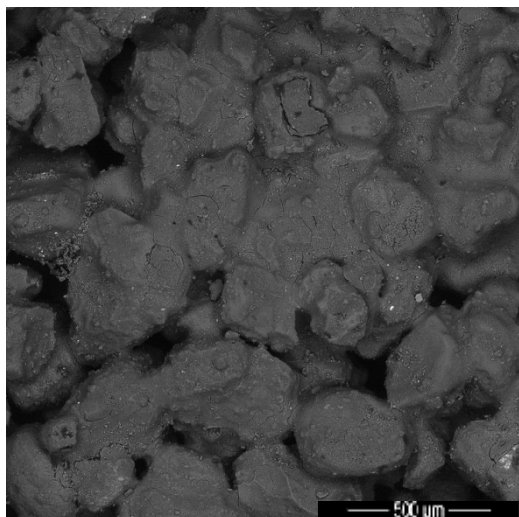


Obr. 37 2D a 3D vizualizace prostoru pórů umělého pískovce s použitím zlatého písku

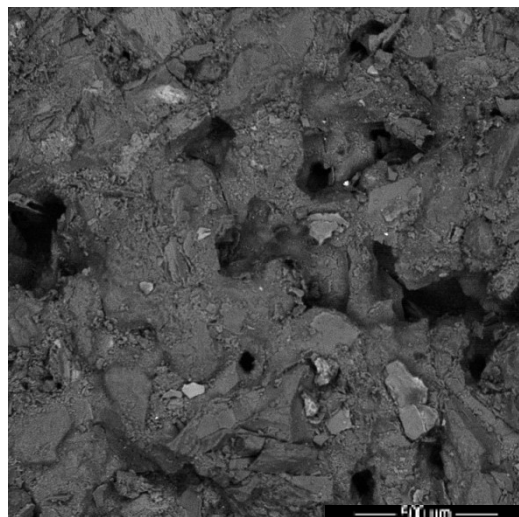
5.5.7 Analýza elektronových mikroskopem

Oba typy vytvořených pískovců byly nařezány na 10 mm tenké plátky a dále podrobeny analýze pod rastrovacím elektronovým mikroskopem (SEM – Scanning Electron Microscope). Z obrázků 38 a 39 je zřejmé, že geopolymerní pojivo má zcela amorfní charakter a je dobře spojeno se zrny kameniva. Na zobrazovaných snímcích je

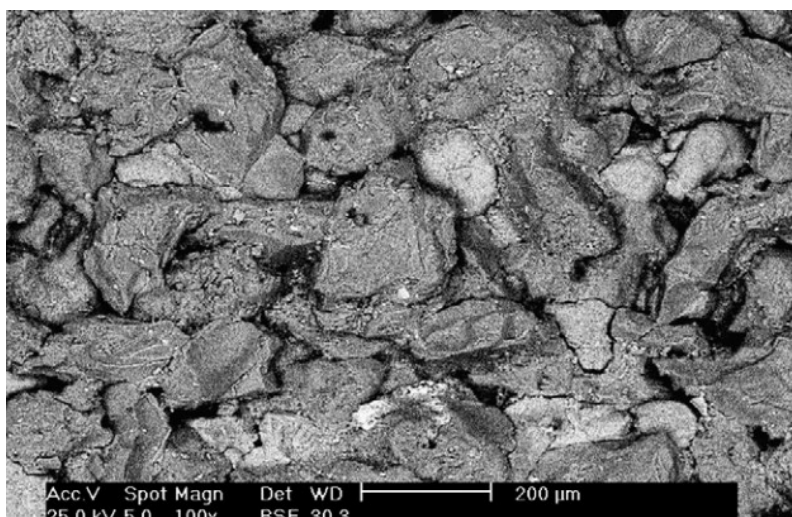
rovněž patrné množství velkých pórů, jež jsou způsobeny nízkým obsahem pojiva, které není schopno vyplnit zcela prostor mezi jednotlivými zrny kameniva. Pro srovnání můžeme na obr. 40 vidět mikroskopický snímek přírodního pískovce, kde si můžeme všimnout také většího množství pórů. U přírodního pískovce jde vidět i větší velikost zrn oproti umělým pískovcům, kde byla použita zrna o velikosti frakce 0,5 a 0,25 mm.



Obr. 38 SEM – umělý pískovec směsi A, zvětšení 140



Obr. 39 SEM – umělý pískovec směsi B, zvětšení 140



Obr. 40 SEM – glaukonitického pískovce, zvětšení 100 [38]

5.6 Srovnání s vybranými přírodními pískovci

Pro porovnání s námi naměřenými hodnotami vytvořených pískovců, jsou v následujících tabulkách uvedeny hodnoty vlastností bělohradského pískovce a glaukonitického pískovce.

Tabulka 10 Fyzikálně – mechanické vlastnosti bělohradského pískovce [42]

Fyzikálně – mechanická vlastnost	Průměrná hodnota
Nasákavost [%]	6,5
Pevnost v tlaku – vysušené vzorky [MPa]	36,1
Pevnost v tlaku po vymrazení – 25 cyklů [MPa]	35,4
Pevnost v tahu za ohybu – vysušené vzorky [MPa]	2,73
Pevnost v tahu za ohybu po vymrazení – 25 cyklů [MPa]	2,65

Tabulka 11 Fyzikálně – mechanické vlastnosti glaukonitického pískovce [38]

Fyzikálně – mechanická vlastnost	Průměrná hodnota
Nasákavost [%]	6,6
Pórovitost [%]	20,4
Pevnost v tlaku – vysušené vzorky [MPa]	59,0
Pevnost v tlaku po vymrazení – 25 cyklů [MPa]	53,0
Pevnost v tahu za ohybu – vysušené vzorky [MPa]	5,6

Tabulka 12 Fyzikálně – mechanické vlastnosti vytvořených pískovců

	Fyzikálně – mechanická vlastnost	Průměrná hodnota
Směs A	Nasákavost [%]	12,4
	Zdánlivá pórovitost [%]	18,6
	Pevnost v tlaku – vysušené vzorky [MPa]	18,4
	Pevnost v tlaku po vymrazení – 25 cyklů [MPa]	24
	Pevnost v tahu za ohybu – vysušené vzorky [MPa]	3,9
	Pevnost v tahu za ohybu po vymrazení – 25 cyklů [MPa]	0,7
Směs B	Nasákavost [%]	10,1
	Zdánlivá pórovitost [%]	20,1
	Pevnost v tlaku – vysušené vzorky [MPa]	12,5
	Pevnost v tlaku po vymrazení – 25 cyklů [MPa]	12,9
	Pevnost v tahu za ohybu – vysušené vzorky [MPa]	3,1
	Pevnost v tahu za ohybu po vymrazení – 25 cyklů [MPa]	2,2

Srovnáme-li námi zjištěné vlastnosti vytvořených pískovců s vlastnostmi přírodních pískovců uvedených v tabulce 10 a 11 zjistíme, že je značný rozdíl v pevnosti v tlaku. Částečnou roli v tom hraje to, že námi vytvořené vzorky se zkoušely na vzorcích, které byly vyjmuty z vlhkostní komory, kdežto vzorky přírodních pískovců byly před zkouškou pevnosti nejdříve vysušeny. Další roli v tom může hrát také velikost zkoušených vzorků. Podíváme-li se ale na pevnosti v ohybu vytvořených i přírodních pískovců, tak zde tak značný rozdíl v pevnosti není, obzvláště srovnáme-li vytvořený pískovec s pískovcem bělohradským, kde jsou pevnosti téměř totožné.

6. Závěr

Cílem diplomové práce bylo připravit vzorky umělých pískovců z běžně dostupných písků a z písků vznikajících jako odpad při plavení kaolínu. Umělé pískovce byly připravovány pomocí vodního skla a geopolymerních pojiv. Dalším cílem bylo stanovení základních mechanicko-fyzikálních vlastností umělých pískovců, pak také vytvořené pískovce podrobit analýze pod elektronovým mikroskopem a počítačovým tomografem a jejich vlastnosti srovnat s pískovci používanými pro stavební a dekorační účely.

Pro tento účel byly navrženy dvě směsi. Kdy jedna směs označována jako směs A byla tvořena z běžného stavebního písku, a druhá směs označována jako směs B byla tvořena ze zlatého písku. Obě směsi byly pojeny metakaolinem s vodním sklem Desil A1. U směsi B bylo použito dvojnásobného množství vodního skla, kvůli lepší konzistenci směsi.

Z výše uvedených výsledků (viz. tabulka 3 a 4) je patrný nárůst pevností u obou směsí u pevnosti ohybem, kde se hodnoty pohybovaly v rozmezí 3,0 až 3,9 MPa. Naopak u pevností v tlaku, si můžeme všimnout mírného poklesu pevnosti ze 14tého na 28 den. Důvodem může být, že zkušební tělesa byla po celou dobu zrání umístěna ve vlhkostní skříni, odkud byla vždy vyjmuta a odzkoušena. Zkušební tělesa nebyla před zkouškou vysušena. Tlakové pevnosti se po 14 dnech pohybovaly v rozmezí od 12,5 do 22,0 MPa.

Na vytvořených pískovcích byla také stanovena nasákavost a zdánlivá pórovitost. Kdy z výše uvedených výsledků v tabulce 5 a 6, se dá usoudit, že umělý pískovec vytvořený ze směsi B je méně nasákavý a více pórovitý, než pískovec vytvořený ze směsi A, jenž je více nasákavý ale s menší pórovitostí. Rozdíl mezi těmito dvěma směsi jak v nasákavosti, tak i v pórovitosti však není velký. U směsi B může větší pórovitost zapříčiněna tím, že směs byla do forem plněna a dusána ručně, takže tím u této směsi mohla být vyvíjena menší síla u plnění, než při tvorbě pískovců ze směsi A. Zkušební tělesa tvořená ze směsi B se také hůře dusala, kvůli o něco hroší konzistenci oproti směsi A. I při použití více vodního skla pro lepší konzistenci, měla směs A konzistenci o něco lepší, proto se vzorky také o něco lépe připravovaly a dusaly.

Vytvořené pískovce byly dále v neposlední řadě také podrobeny zkoušce mrazuvzdornosti. Kdy podstatou zkoušky bylo stanovení poměru mezi pevností za ohybu zkušebních těles po 25 zmrazovacích a rozmrazovacích cyklech a zkušebních tělesech, které nebyly vystaveny zmrazovacím cyklům. Během zkoušky nebyly na zkušebních

tělesech, až na jedno zkušební těleso směsi A, zaznamenány žádné výrazné degradační procesy způsobené střídavým působením mrazu. Pouze jedno zkušební těleso v zmrazovacích a rozmrazovacích cyklech neobstálo a v 16 cyklu bylo porušeno. Z grafického vyhodnocení zkoušky (viz. obr. 30) vidíme, že pevnost v ohybu u směsi B poklesla pouze o 29% oproti referenčním vzorkům. Hodně výrazný pokles pevnosti v ohybu nastal u směsi A, kde pevnost klesla o 82%. Důvodem bylo lehké porušení vzorků, kdy se na povrchu vzorků nalézaly nepatrné trhlinky.

7. Seznam použitých zdrojů

Technické normy:

- [1] ČSN EN 14 618 Umělý kámen – terminologie a klasifikace, Český normalizační institut, Praha, 2005
- [2] ČSN EN 196-1 Metody zkoušení cementu – Část 1: Stanovení pevnosti, Český normalizační institut, Praha, 2005
- [3] ČSN EN 14617-1 Umělý kámen – Zkušební metody – Část 1: Stanovení objemové hmotnosti a nasákavosti vodou, Český normalizační institut, Praha, 2005
- [4] ČSN EN 14617-5 Umělý kámen – Zkušební metody – Část 5: Stanovení mrazuvzdornosti, Český normalizační institut, Praha, 2005

Literatura:

- [5] STEFANIDOU, M., PACHTA, V., PAPAYIANNI, I.: Desing and testing of artificial stone for the restoration of stone elements in monuments and historic buildings, Construction and building materials, 93, 2015, Elsevier
- [6] KOTLÍK, P. Umělý kámen – materiál pro tmely, doplňky a kopie, Zpravodaj STOP – svazek 12, Společnost pro technologie ochrany památek, Praha, 2010, s. 4 – 10
- [7] KOTLÍK, P. Technologie přípravy umělého kamene, Umělý kámen pro památkovou péči, seminář STOP, Lapidárium Národního muzea, Praha, 1998, s. 9 – 18
- [8] JUSTA, P. Alternativní plniva v umělém kameni, Umělý kámen pro památkovou péči, seminář STOP, Lapidárium Národního muzea, Praha, 1998, s. 25 – 26
- [9] KOTLÍK, P. Stavební materiály historických objektů, Praha: VŠCHT v Praze, 1999. ISBN 80-7080-347-9
- [10] HUCKOVÁ, M., KOTLÍK, P. Umělý kámen s epoxidovým pojivem, Zprávy památkové péče – 69/6, Národní památkový ústav, Praha, 2009, s. 458 – 464

- [11] RATHOUSKÝ, J. Zkušenosti s umělým kamenem s epoxidovým pojivem. In: Umělý kámen pro památkovou péči, seminář STOP. Praha: Lapidárium Národního muzea, 1998, s. 19 – 21
- [12] NOVOTNÝ, J. Zkušenosti s umělým kamenem: Umělý kámen na minerálním základě. In: Umělý kámen pro památkovou péči, seminář STOP. Praha: Lapidárium Národního muzea, 1998, s. 22 – 24
- [13] NEJEDLÝ, V. Umělý kámen v restaurování výtvarných děl: pohled památkáře. In: Umělý kámen pro památkovou péči, seminář STOP. Praha: Lapidárium Národního muzea, 1998, s. 5 – 6
- [14] ŠKVÁRA, F. Alkalicky aktivované materiály – geopolymery. Informátor: Česká společnost pro výzkum a využití jílu. 2007, 37, s. 1 - 4. ISSN 1802-2499
- [15] ZHANG, Y.; XING, J.; YU, L.; LI, J. Preparation and characterization of functional geopolymer. In Advanced material research, 2008, vol. 47, s. 977–979
- [16] CAIUN, S.; KRIVENKO P.V.; ROY D. Alkali-Activated Cements and Concretes. Abingdon: Taylor & Francis, 2006. ISBN 978-0-415-70004-7. s. 1 – 2
- [17] PACHEO-TOGAL, F.; CASTRO-GOMAS, J.; JALALI, S. Alkali activated binders, Part 2. About materials and binders manufacture, In: Construction and Building Materials, 2007, s. 3 – 6
- [18] DAVIDOVITS, J. Properties of geopolymer cements. In 1st International Conference on Alkaline Cements and Concretes, Kiev: Kiev State Technical University, Kiev, Ukraine, 1994, 131 – 149.
- [19] BARBOSA, V. F. F., MACKENZIE, K. J. D., THAUMATURGO, C. Synthesis and characterisation of materials based on inorganic polymers of alumina and silica: sodium polysialate polymers. International Journal of Inorganic Materials, 2000, 2, 309 – 317.
- [20] ŠOUKAL, F.; OPRAVIL, T.; PTÁČEK, P.; FOLLER, B.; BRANDŠTETR, J. Geopolymers – amorphous ceramics via solution. In Some thermodynamic, structural and behavioral aspects of materials accentuating non-crystalline states. Plzeň: 2009. s. 14 – 18

- [21] ROVNANÍK, P. Úvod do problematiky geopolymérů. In: Geopolymery v památkové péči. Praha: Kloknerův ústav ČVUT, 2012, s. 4 – 11
- [22] OPRAVIL, T.; BRANŠTETR J.; HAVLICA, J.; FRANK, V. Geopolymery na bázi metakaolinu aktivovaného sodnými a draselnými sloučeninami. In: Metakaolin 2008 Sborník příspěvků semináře. Brno: VUT v Brně, 2008, s. 80 – 86
- [23] PACHEO-TOGAL, F.; CASTRO-GOMAS, J.; JALALI, S. Alkali activated binders, Part 2. About materials and binders manufacture, In: Construction and Building Materials, 2007, s. 3 – 6
- [24] TALLING, B.; BRANDSTETR, J. Present state and Future of Alkali-Activated Slag Concretes, Trondheim Conference 1989, s. 1520 – 1545
- [25] ANTOŠ, P.; KOUTNÍK, P. Alkalické aktivátory metakaolinu. In: Metakaolin 2008 Sborník příspěvků semináře. Brno, 20. března 2008. s. 5 – 10, ISBN 978-80-214-3582-7
- [26] DAVIDOVITS, J. Geopolymer chemistry and Applications. Geopolymer Institute, St. Quentin, 2008
- [27] VAVRO, M., VAVRO, L., MARTINEC, P. Barevně a texturně zajímavé křídové pískovce České republiky, Zpravodaj WTA, 1 – 2 (2009)
- [28] RYBAŘÍK, V. Pískovcové lomy na Hořicku na počátku 40. let 19. století. In: Kámen, vol. 13, 1. Praha: Svaz kameníků a kamenosochařů, 2007, s. 15-20.

Internetové zdroje:

- [29] Are Pyramids Made Out of Concrete?. Geopolymer [online]. 2006 [cit. 2017-11-22]. Dostupné z: <http://www.geopolymer.org/archaeology/pyramids/are-pyramids-made-out-of-concrete-1/>
- [30] <http://www.kralovskacesta.cz/cs/prohlidka/objekty.html>
- [31] KOTLÍK, P. Umělý kámen – užití a vlastnosti [online]. 2010 [cit. 2017-11-22]. Dostupné z: http://imaterialy.dumabyt.cz/rubriky/materialy/umely-kamen-uziti-a-nbsp-vlastnosti_101489.html

- [32] KUCHAR, J. Umělý kámen k nerozeznání od přírodního. In: Stavebnictví [online]. 2007 [cit. 2017-11-22]. Dostupné z: <http://www.stavebnictvi3000.cz/clanky/umely-kamen-k-nerozeznani-od-prirodniho/>
- [33] Série TVD – štípaná břidlice. Magicrete.cz [online]. 2000 [cit. 2017-11-22]. Dostupné z: <http://www.magicrete.cz/produkty/umely-kamen/1188.html>
- [34] Umělý mramor: Nezničitelný materiál pro každou koupelnu. In: IDNES [online]. 2006 [cit. 2017-11-22]. Dostupný z: http://bydleni.idnes.cz/umely-mramor-neznitelny-material-pro-kazdou-koupelnu-pkk-/koupelna.aspx?c=A060707_121819_koupelna_pet
- [35] Akrylát versus mramor – jaký materiál zvolit do koupelny? In: Bydlení pro každého [online]. 2013 [cit. 2017-11-22]. Dostupný z: <http://koupelny-wc.bydleniprokazdeho.cz/koupelny-a-wc/akrylat-versus-lity-mramor-jaky-material-zvolit-do-koupelny.php>
- [36] Litý mramor. In: Aretti zakázkové interiéry [online]. [cit. 2017-11-22]. Dostupný z: <http://www.zakazkoveinteriery.cz/produkty/lity-mramor>
- [37] SLÁVIK, R.; BEDNAŘÍK V.; VONDRUŠKA, M. Geopolymery a jejich použití pro nakládání s odpady. Odpady [online]. 2006 [cit. 2017-11-22]. Dostupné z: <http://odpady.ihned.cz/c1-18251200-geopolymery-a-jejich-pouziti-pro-nakladani-s-odpady>
- [38] MARTINEC, P., VAVRO, J., SCUCCA a MASLAN, M. Properties and durability assessment of glauconitic sandstone: A case study on Zamel sandstone from the Bohemian Cretaceous Basin (Czech Republic). Engineering Geology [Online]. 2010, [cit. 2017-11-22]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0013795209002026>
- [39] RYBAŘÍK, V. Hořícký pískovec z Podhorního Újezdu. Revue Kámen [online]. 2001 [cit. 2017-11-22]. Dostupné z: <http://www.revuekamen.cz/horicky-piskovec.htm>
- [40] Mšenské pískovce [online]. [cit. 2017-11-22]. Dostupné z: http://msenskepiskovce.cz/index.php?option=com_content&task=view&id=15&Itemid=3

- [41] RYBAŘÍK, V. Božanovský pískovec. Revue Kámen [online]. 2001 [cit. 2017-11-22]. Dostupné z: <http://www.revuekamen.cz/bozanovsky-piskovec.htm>
- [42] VAVRO, M.; VAVRO, L.; PETRŮ, J.; MARTINEC, P.; SCUČKA, J. Bělohradský pískovec z lomu Javorka. [online]. [cit. 2017-11-22]. Dostupné z: <http://www.revuekamen.cz/belohradsky-piskovec.htm>

Seznam obrázků

Obr. 1: Kohlova kašna a sousoší Madony se sv. Dominikem a T. Akvinským [30].....	14
Obr. 2: Kopie sochy M. B. Brauna Onufrius z Nového lesa u Kuksu [31]	17
Obr. 3 Závislost odrazivosti umělého kamene na koncentraci pigmentu pro směsi s různými pojivy. Měření bylo prováděno při vlnové délce 520 nm [9].	19
Obr. 4: Tympanon kostela P. M. Sněžné v Praze[31]	21
Obr. 5: Váza na Vrtbovské zahrady v Praze [31]	21
Obr. 6: Venkovní obklad z umělého kamene – břidlice [33]	23
Obr. 7: Umyvadlo z litého mramoru [36].....	24
Obr. 8: Sousoší sv. Kajetána na Karlově mostě v Praze [30].....	25
Obr. 9 Stavba z gruntosilikátových bloků [14]	26
Obr. 10 Produkty vznikající při polykondenzaci [18]	28
Obr. 11 Struktura geopolymery [19]	28
Obr. 12 Ukázka komerčních metakaolinů: Mefisto K-05 (vlevo) a Mefisto L-05 (vpravo)30	
Obr. 13 Možné využití geopolymery dle poměrů Si/Al [26]	33
Obr. 14 Hořický pískovec [37].....	35
Obr. 15 Mšenský pískovec [38].....	36
Obr. 16 Božanovský pískovec [39]	36
Obr. 17 Použité suroviny – metakaolin (vlevo), běžný písek, zlatý písek (vpravo).....	37
Obr. 18 Sada zkušebních trámeček velikosti 40x40x160 mm	39
Obr. 19 Míchačka pro přípravu směsi	39
Obr. 20 Forma pro přípravu trámeček.....	39
Obr. 21 Zkoušený trámeček před provedením zkoušky pevnosti v tahu za ohybu	40
Obr. 22 Zkoušený trámeček po provedení zkoušky pevnosti v tahu za ohybu	40
Obr. 23 Zkoušený vzorek před provedením zkoušky pevnosti v tlaku	41
Obr. 24 Zkoušený vzorek po provedení zkoušky pevnosti v tlaku	41
Obr. 25 Zkušební tělesa umístěna v mrazicím boxu	42
Obr. 26 Vážení vzorků na hydrostatické váze	44
Obr. 27 Třepací stůl.....	44
Obr. 28 Vyluhování vzorků.....	44
Obr. 29 Pevnosti v tahu ohybem obou typů pískovců.....	46
Obr. 30 Pevnosti v tlaku obou typů pískovců.....	47
Obr. 31 Nasákavost obou typů pískovců.....	48

Obr. 32 Zdánlivá pórovitost obou typů pískovců	49
Obr. 33 Pokles pevnosti v tahu ohybem po 25 zmrazovacích a rozmrazovacích cyklech obou pískovců.....	50
Obr. 34 Pokles pevnosti v tlaku po 25 zmrazovacích a rozmrazovacích cyklech obou pískovců.....	51
Obr. 35 Porušení vzorku v 16 cyklu	52
Obr. 36 Úbytek materiálu na vzorcích směsi B.....	52
Obr. 37 2D a 3D vizualizace prostoru pórů umělého pískovce s použitím zlatého písku...	53
Obr. 38 SEM – umělý pískovec směsi A, zvětšení 140	54
Obr. 39 SEM – umělý pískovec směsi B, zvětšení 140.....	54
Obr. 40 SEM – glaukonitického pískovce, zvětšení 100 [38]	54

Seznam tabulek

Tabulka 1 Chemické složení zlatého písku	38
Tabulka 2 Složení směsí umělého pískovce s geopolymerním pojivem	38
Tabulka 3 Vyhodnocení zkoušek pevnosti v tahu ohybem	45
Tabulka 4 Vyhodnocení zkoušek pevnosti v tlaku.....	46
Tabulka 5 Vyhodnocení nasákavosti	48
Tabulka 6 Vyhodnocení zdánlivé pórovitosti.....	49
Tabulka 7 Vyhodnocení mrazuvzdornosti pro pevnost v tahu ohybem	50
Tabulka 8 Vyhodnocení mrazuvzdornosti pro pevnost v tlaku.....	51
Tabulka 9 Vyhodnocení pH.....	52
Tabulka 10 Fyzikálně – mechanické vlastnosti bělohorského pískovce [42].....	55
Tabulka 11 Fyzikálně – mechanické vlastnosti glaukonitického pískovce [38]	55
Tabulka 12 Fyzikálně – mechanické vlastnosti vytvořených pískovců	55